

# **DISPOSITIVO PARA MEDIR FUERZA Y VELOCIDAD DE LOS GOLPES DE UN DEPORTISTA DE COMBATE**

**JAIRO ANDRÉS PICO MORALES  
RICARDO RESTREPO ARAMBURO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Biomédico**

**Yeison Javier Montagut Ferizzola, Ph.D.**



**ESCUELA DE INGENIERÍA DE ANTIOQUIA  
UNIVERSIDAD CES  
INGENIERÍA BIOMÉDICA  
ENVIGADO**

**2014**

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestro director, Yeison Montagut, por su constante apoyo e ideas para el desarrollo de este proyecto.

A Yesid Montoya por toda la ayuda brindada y al personal de los laboratorios y talleres por su buena actitud para atender nuestras necesidades.

A nuestras familias y amigos que siempre estuvieron pendientes y dispuestos a ayudarnos como les fuera posible.

Muchas gracias.

# CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	11
1. PRELIMINARES.....	12
1.1 Planteamiento del problema .....	12
1.2 Objetivos del proyecto .....	12
1.2.1 Objetivo General.....	12
1.2.2 Objetivos Específicos .....	12
1.3 Marco de referencia.....	12
1.3.1 Generalidades del músculo .....	12
1.3.2 Fuerza muscular.....	13
1.3.3 Velocidad en el ámbito deportivo.....	15
1.3.4 Potencia Muscular .....	15
1.3.5 Importancia de la aceleración en el deporte .....	16
1.3.6 Entrenamiento deportivo.....	16
1.3.7 Entrenamiento de la fuerza muscular .....	17
1.3.8 Entrenamiento de la velocidad de reacción .....	18
1.3.9 Entrenamiento de la potencia muscular .....	19
1.3.10 Sensores .....	20
1.3.11 Dispositivos automatizados .....	21
2. METODOLOGÍA.....	23
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO .....	25
3.1 Selección de transductores y dispositivos.....	25
3.1.1 Proceso de diseño.....	25

3.1.2	Selección de elementos.....	38
3.2	Construcción del sistema de instrumentación.....	38
3.2.1	Diseño y desarrollo de circuitos eléctricos .....	38
3.2.2	Desarrollo del software .....	42
3.2.3	Diseño y construcción de la estructura física .....	47
3.2.4	Calibración de dispositivos .....	49
3.3	Evaluación de desempeño del dispositivo construido .....	52
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
4.1	Selección de transductores y dispositivos.....	53
4.2	Construcción del sistema de instrumentación.....	53
4.2.1	Circuitos eléctricos .....	53
4.2.2	Software .....	59
4.2.3	Estructura física.....	63
4.3	Evaluación de desempeño del dispositivo .....	63
4.3.1	Prueba 1: Fuerza y aceleración .....	63
4.3.2	Prueba 2: Velocidad de reacción .....	74
4.3.3	Prueba 3: Potencia .....	79
5.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES .....	81
	BIBLIOGRAFÍA.....	82

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1. MATRIZ DE NECESIDADES-SOLUCIONES.....	28
TABLA 2. MATRIZ MORFOLÓGICA DE SOLUCIONES.....	33
TABLA 3. REGISTRO DE SOLUCIONES.....	34
TABLA 4. MATRIZ DE CALIFICACIÓN .....	38
TABLA 5. DATOS OBTENIDOS PARA LA PRUEBA 1.....	49
TABLA 6. DATOS OBTENIDOS PARA LA PRUEBA 2.....	50
TABLA 7. DATOS PROMEDIO DE LAS PRUEBAS 1 Y 2. ....	50
TABLA 8. REGRESIÓN LINEAL Y COEFICIENTE DE PEARSON.....	51
TABLA 9. ECUACIONES DE FUERZA PARA CADA CELDA.....	52
TABLA 10. SENSIBILIDAD DEL ACELERÓMETRO CON ALIMENTACIÓN DE 3.3V (DATOS DEL FABRICANTE).....	52
TABLA 11. DATOS DE FUERZA Y ACELERACIÓN DEL SUJETO 1.....	64
TABLA 12. DATOS DE FUERZA Y ACELERACIÓN DEL SUJETO 2.....	66
TABLA 13. DATOS DE FUERZA Y ACELERACIÓN DEL SUJETO 3.....	68
TABLA 14. DATOS DE FUERZA Y ACELERACIÓN DEL SUJETO 4.....	70
TABLA 15. DATOS DE FUERZA Y ACELERACIÓN DEL SUJETO 5.....	72
TABLA 16. DATOS DE VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 1.....	74
TABLA 17. DATOS DE VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 2.....	75
TABLA 18. DATOS DE VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 3.....	76
TABLA 19. DATOS DE VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 4.....	77
TABLA 20. DATOS DE VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 5.....	78
TABLA 21. RESULTADOS DE PRUEBA DE POTENCIA. ....	80

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. TIEMPO PROMEDIO PARA ALCANZAR FUERZA MÁXIMA (ZATSIORSKY, 2006).	14
FIGURA 2. CURVA DE FUERZA-VELOCIDAD(BROWN, 2008).	14
FIGURA 3. TIEMPO NECESARIO PARA GENERAR UNA FUERZA DE 500N EN LOS EXTENSORES DE LAS PIERNAS DURANTE UN EJERCICIO DE EXPLOSIÓN (GONZÁLEZ BADILLO & GOROSTIAGA AYESTARÁN, 2002)	17
FIGURA 4. ESQUEMA GENERAL DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SENSOR (MEIJER, 2008).	20
FIGURA 5. CAJA NEGRA DEL DISEÑO DEL DISPOSITIVO	31
FIGURA 6. CAJA TRANSPARENTE DEL DISEÑO DEL DISPOSITIVO	32
FIGURA 7. CONCEPTOS SOLUCIÓN	36
FIGURA 8. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LOS CIRCUITOS ELÉCTRICOS	39
FIGURA 9. ACELERÓMETRO 832M1-100 DE MEASUREMENT SPECIALTIES	39
FIGURA 10. DIMENSIONES Y CONEXIONES DEL ACELERÓMETRO 832M1-100 SEGÚN FABRICANTE.	40
FIGURA 11. SIMULACIÓN DE ACONDICIONAMIENTO DEL CIRCUITO DE ACELERACIÓN.	40
FIGURA 12. CONFIGURACIÓN DEL MÓDULO XBEE EMISOR.	41
FIGURA 13. SIMULACIÓN DE ACONDICIONAMIENTO DEL CIRCUITO DE FUERZA.	41
FIGURA 14. A) MATRIZ DE LEDS. B) DIAGRAMA DE CONEXIONES.	42
FIGURA 15. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE FUERZA.	43
FIGURA 16. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE ACELERACIÓN.	44
FIGURA 17. DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROGRAMA QUE MIDE LA VELOCIDAD DE REACCIÓN.	45
FIGURA 18. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA ENCARGADO DEL CONTEO DE GOLPES EN 10 SEGUNDOS.	47
FIGURA 19. MODELO CAD DE LA ESTRUCTURA.	48
FIGURA 20. ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS DE LA ESTRUCTURA CON UNA CARGA DE 4500N.	49
FIGURA 21. GRÁFICA DE CALIBRACIÓN DE LAS CELDAS DE CARGA.	51
FIGURA 22. ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE FUERZA.	54
FIGURA 23. DISEÑO PCB DE CIRCUITO DE MEDICIÓN DE FUERZA.	55
FIGURA 24. CIRCUITO DE MEDICIÓN DE FUERZA.	55
FIGURA 25. ESQUEMÁTICO DE REGULACIÓN DE VOLTAJE Y TRANSMISIÓN DE DATOS DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE ACELERACIÓN.	56
FIGURA 26. ESQUEMÁTICO DE MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE DATOS DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE ACELERACIÓN.	57
FIGURA 27. DISEÑO PCB DE REGULACIÓN DE VOLTAJE Y TRANSMISIÓN DE DATOS DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE ACELERACIÓN.	57
FIGURA 28. DISEÑO PCB DE MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE DATOS DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE ACELERACIÓN.	58

FIGURA 29. CIRCUITO DE REGULACIÓN DE VOLTAJE Y TRANSMISIÓN DE DATOS DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE ACELERACIÓN.....	58
FIGURA 30. CIRCUITO DE MEDICIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DE DATOS DEL CIRCUITO DE MEDICIÓN DE ACELERACIÓN. ....	59
FIGURA 31. PESTAÑA “DATOS TRANSMISIÓN” DEL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE FUERZA Y ACELERACIÓN. ....	60
FIGURA 32. PESTAÑA “GRÁFICAS” DEL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE FUERZA Y ACELERACIÓN.....	60
FIGURA 33. PESTAÑA “VELOCIDAD” DEL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE FUERZA Y ACELERACIÓN.....	61
FIGURA 34. PESTAÑA “FUERZA” DEL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE FUERZA Y ACELERACIÓN.....	61
FIGURA 35. INTERFAZ GRÁFICA PARA EL PROGRAMA DE MEDICIÓN DE VELOCIDAD DE REACCIÓN. ....	62
FIGURA 36. INTERFAZ GRÁFICA PARA EL PROGRAMA DE CONTEO DE GOLPES EN 10 SEGUNDOS. ....	62
FIGURA 37. ESTRUCTURA FÍSICA DEL DISPOSITIVO. ....	63
FIGURA 38. RELACIÓN FUERZA- ACELERACIÓN PARA EL SUJETO 1.....	64
FIGURA 39. FUERZA EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 1. ....	65
FIGURA 40. ACELERACIÓN EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 1. ....	65
FIGURA 41. RELACIÓN FUERZA- ACELERACIÓN PARA EL SUJETO 2.....	66
FIGURA 42. FUERZA EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 2. ....	67
FIGURA 43. ACELERACIÓN EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 2. ....	67
FIGURA 44. RELACIÓN FUERZA- ACELERACIÓN PARA EL SUJETO 3.....	68
FIGURA 45. FUERZA EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 3. ....	69
FIGURA 46. ACELERACIÓN EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 3. ....	69
FIGURA 47. RELACIÓN FUERZA- ACELERACIÓN PARA EL SUJETO 4.....	70
FIGURA 48. FUERZA EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 4. ....	71
FIGURA 49. ACELERACIÓN EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 4. ....	71
FIGURA 50. RELACIÓN FUERZA- ACELERACIÓN PARA EL SUJETO 5.....	72
FIGURA 51. FUERZA EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 5. ....	73
FIGURA 52. ACELERACIÓN EN CADA GOLPE PARA EL SUJETO 5. ....	73
FIGURA 53. VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 1 EN CADA PRUEBA. ....	75
FIGURA 54. VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 2 EN CADA PRUEBA. ....	76
FIGURA 55. VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 3 EN CADA PRUEBA. ....	77
FIGURA 56. VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 4 EN CADA PRUEBA. ....	78
FIGURA 57. VELOCIDAD DE REACCIÓN DEL SUJETO 5 EN CADA PRUEBA. ....	79
FIGURA 58. PRUEBA DE POTENCIA.....	80

## **LISTA DE ANEXOS**

ANEXO 1. PROTOCOLO DE EVALUACIÓN.....	85
ANEXO 2. CONSENTIMIENTO INFORMADO .....	86



## RESUMEN

En este trabajo se desarrolló un dispositivo que permite obtener mediciones de la fuerza y aceleración de golpeo como una herramienta de ayuda para la planificación del entrenamiento de un deportista de combate. Esto con el fin de hacer una cuantificación de las aptitudes físicas del deportista.

El dispositivo está construido en acero y se puede empotrar fácilmente a la pared con tornillos. Para lograr medir la fuerza del impacto, el dispositivo cuenta con cuatro celdas de carga que en total pueden medir un golpe de hasta 400 kg. Se utiliza un acelerómetro con capacidad máxima de medida de 100 g (aproximadamente 98 m/s<sup>2</sup>) para la medición de aceleración.

Una de las ventajas de este desarrollo es que permite medir la aceleración del golpe de manera inalámbrica, facilitando la realización del gesto deportivo de una manera más natural. Los circuitos para medir la aceleración van en un brazalete que usa el deportista al momento de realizar las pruebas y tiene una distancia máxima de transmisión de 30 m.

Además de medir fuerza y aceleración, el dispositivo permite cuantificar otras aptitudes que pueden ser de utilidad para deportistas de combate como la velocidad de reacción ante un estímulo visual y la potencia medida como la cantidad de golpes realizados en un intervalo de tiempo definido.

Se desarrolló un protocolo de evaluación para el dispositivo y se implementó con cinco voluntarios. Los resultados de estas pruebas indican que el dispositivo desarrollado puede medir con precisión las variables de interés y que este podría ser utilizado con deportistas de combate para un seguimiento de las aptitudes mencionadas.

Palabras clave: Deportes de combate, entrenamiento deportivo, fuerza muscular, sistema de instrumentación, velocidad de movimiento.

## **ABSTRACT**

A device was developed that can measure the force and acceleration of a strike as an aiding tool in planning the training of a combat athlete. This was done in order to make a quantification of the physical abilities of the athlete.

The device is built with steel and can be easily placed on a wall using screws. To measure the force of the impact, the device has four load cells that can measure up to 400 kg altogether. An accelerometer with maximum measurement capacity of 100 g (approximately 98 m/s<sup>2</sup>) is used to measure the acceleration.

One of the advantages of this development is that it allows a wireless measurement of acceleration, easing the natural movement of the gesture. The circuits to measure acceleration are placed on the athlete's arm during the trials and can transmit data at a maximum distance of 30 m.

Besides measuring force and acceleration, the device allows to quantify other aptitudes that can be useful for a combat athlete such as reaction time to a visual stimulus and power measured as the amount of strikes made during a known time period.

An evaluation protocol was developed and implemented with five volunteers. The results of these trials suggest that the device can measure precisely the variables of interest and that it could be used with real combat athletes for a follow up of said variables.

Key words: Combat sports, sports training, muscle force, instrumentation system, movement speed.

## INTRODUCCIÓN

Para una adecuada iniciación del proceso de formación en la actividad física y deportiva, es necesaria la detección oportuna de las potencialidades bio-físicas, sobre las cuales se basará el desarrollo y adquisición de las capacidades. Por lo tanto es de gran importancia contar con parámetros científicos y ayudas tecnológicas que permitan la interpretación del desarrollo físico.

En los deportes de combate y artes marciales la capacidad motora del deportista es fundamental para lograr un buen desempeño y obtener excelentes resultados. En muchos casos, cuantificar la fuerza y la velocidad es algo complicado. Esa valoración se hace – generalmente- por consideraciones de los entrenadores o especialistas, generando un margen de error demasiado amplio, que redundará en fallas de planificación del entrenamiento. De ahí nace la necesidad de crear dispositivos que permitan la medición de las cualidades anteriormente mencionadas.

Con este trabajo se desarrolló un dispositivo que permite obtener mediciones de la fuerza y aceleración de golpeo, cantidad de golpes en un intervalo de tiempo y la velocidad de reacción de un deportista de combate o artista marcial. La obtención de los datos se hace con el propósito de mejorar la planificación de los entrenamientos, identificando las cualidades físicas a mejorar y las que se encuentran en un óptimo nivel de desarrollo.

Inicialmente se realizó una revisión bibliográfica para establecer los requerimientos con los cuales debía cumplir el dispositivo, de tal manera que las aptitudes físicas a medir fuesen las más importantes para el rendimiento de un deportista de combate. Analizando los conceptos de varios autores, como Bompa y Grosser, se pudo establecer que esas aptitudes eran la fuerza, la velocidad y la potencia.

Posteriormente se presenta el diseño del dispositivo. Durante este proceso se realizaron los diseños de los circuitos que permitían hacer la medición de las aptitudes físicas y el procesamiento de los datos por medio de un computador. Además se presenta el diseño de la estructura física encargada de recibir los golpes.

Finalmente se muestra el proceso de construcción de hardware y software, y la realización de un protocolo de prueba de funcionamiento que dieron como resultado un dispositivo capaz de medir la fuerza y aceleración de un golpe, la velocidad de reacción y la cantidad de golpes realizados en un tiempo de 10 segundos.

# **1. PRELIMINARES**

## **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Se requiere del desarrollo de un dispositivo tecnológico que permita analizar fuerza y velocidad de los golpes de un deportista de combate, durante su entrenamiento con el fin de obtener datos cuantitativos que permitan realizar inferencias acerca de los planes de entrenamiento más convenientes para el desarrollo del deportista.

## **1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1 Objetivo General**

Desarrollar un dispositivo que permita medir cuantitativamente la fuerza y la velocidad de los golpes de un deportista durante un intervalo de tiempo definido, enfocado a la planificación de entrenamiento de deportes de combate.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Seleccionar los transductores y dispositivos adecuados para la medición de los valores de fuerza y velocidad durante el gesto deportivo.
- Construir el sistema de instrumentación para la medición de la fuerza y la velocidad en el gesto deportivo.
- Evaluar el desempeño del sistema implementado o construido mediante pruebas de campo.

## **1.3 MARCO DE REFERENCIA**

En este capítulo se explican, en primer lugar, algunos aspectos importantes sobre la anatomía y la fisiología del entrenamiento deportivo y luego sobre los métodos eléctricos para medir algunas variables de interés en el deporte.

### **1.3.1 Generalidades del músculo**

Los músculos son órganos formados por tejido muscular y se encargan del movimiento y la postura corporal, generan calor y proveen protección. El tejido muscular está constituido por células alargadas llamadas fibras musculares, las cuales utilizan ATP para la generación de fuerza (Tortora & Derrickson, 2006).

A la unión de fibras musculares con células nerviosas se le denomina placa motora o unión neuromuscular. Una fibra muscular solo puede tener una unión neuromuscular, sin embargo una célula nerviosa o motoneurona puede inervar a varias fibras musculares. Al conjunto

formado por una motoneurona y todas sus fibras musculares inervadas se le denomina unidad motora (Baechle, Earle, & National Strength and Conditioning Association, 2007).

Las fibras musculares se componen principalmente de miofibrillas que permiten la contracción muscular, puesto que contienen los miofilamentos, actina y miosina, que son la unidad contráctil más pequeña del músculo (Baechle et al., 2007).

De acuerdo con la localización y características estructurales, el tejido muscular puede clasificarse en tres tipos:

- Tejido muscular esquelético: se encuentra unido a los huesos del esqueleto y se considera un tejido voluntario puesto que tiene la capacidad de relajarse o contraerse de manera consiente. Está compuesto por fibras largas, estriadas y cilíndricas. Dentro de un músculo las fibras se ubican paralelas entre sí.
- Tejido muscular cardíaco: forma la mayor parte de las paredes del corazón. Al igual que el tejido esquelético es estriado, sin embargo, es involuntario debido a que su contracción no se puede controlar de manera consiente. Estas fibras se encuentran ramificadas entre sí.
- Tejido muscular liso: este tejido se ubica en estructuras internas huecas como vasos sanguíneos, vías aéreas y tubo digestivo. Sus fibras son cortas, no presentan estrías y por lo general son involuntarias (Tortora & Derrickson, 2006).

Los músculos esqueléticos producen movimiento ejerciendo fuerza sobre los tendones, los que a su vez ejercen una fuerza de tracción sobre los huesos y otras estructuras. Cuando un músculo se contrae, hace tracción con uno de los huesos articulares hacia otro. Los huesos implicados no tienden a moverse de igual forma en respuesta a la contracción, ya que hay tendencia de permanecer en la posición original (Tortora & Derrickson, 2006)

### **1.3.2 Fuerza muscular**

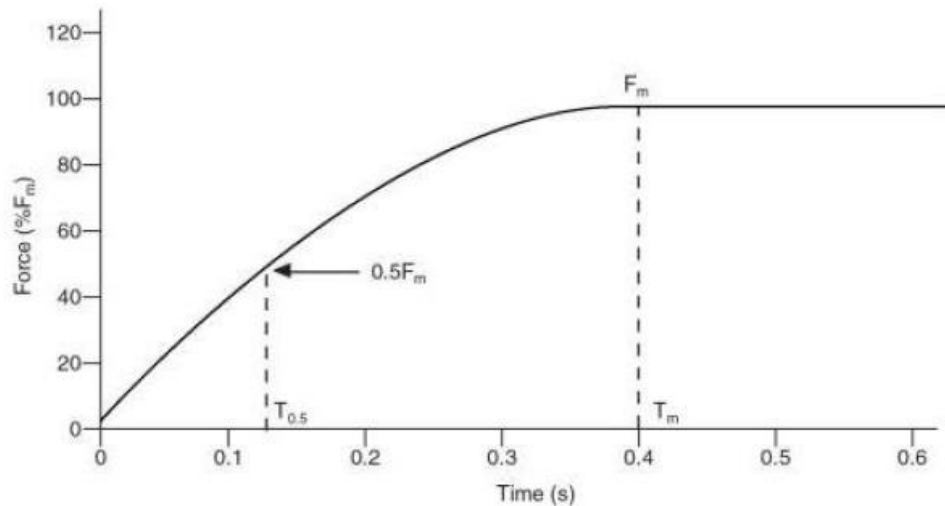
La fuerza muscular es la capacidad que tiene un músculo o grupo muscular de realizar una fuerza contráctil máxima en contra de una resistencia durante una sola contracción. La fuerza máxima se desarrolla cuando el grupo muscular no desarrolla rotación, es decir, la velocidad de rotación articular es cero (Heyward, 2008).

La fuerza en el ámbito deportivo es la capacidad para producir una tensión muscular bajo unas condiciones determinadas por la posición del cuerpo, tipo de activación y la velocidad del movimiento (González Badillo & Gorostiaga Ayestarán, 2002).

La magnitud de la fuerza producida por un músculo está determinada por el número de puentes de miosina unidos a filamentos de actina en un momento dado. La cantidad de puentes está regida por varios factores como el reclutamiento de unidades motoras, área de sección transversal y velocidad de acortamiento (Baechle et al., 2007).

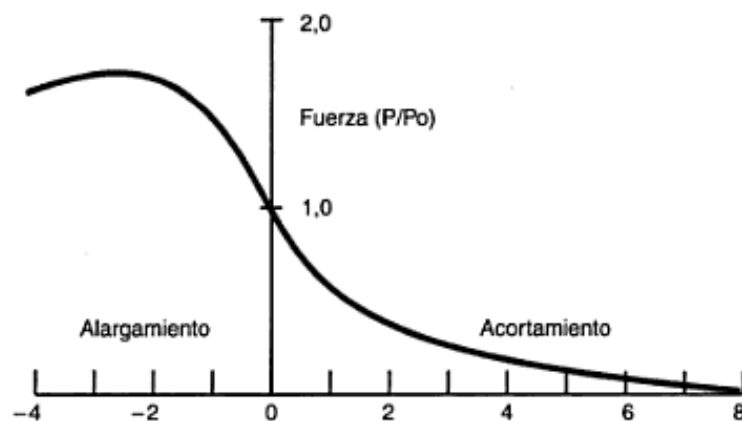
Para lograr la fuerza máxima durante la ejecución de un movimiento se necesita un periodo de tiempo (figura 1). El tiempo para alcanzar el pico máximo de fuerza varía de acuerdo a

cada persona y al movimiento que se realiza; en promedio se encuentra entre 0,3 y 0,4 segundos (Zatsiorsky, 2006).



**Figura 1. Tiempo promedio para alcanzar fuerza máxima (Zatsiorsky, 2006).**

La curva de fuerza-velocidad (figura 2) muestra relación entre la velocidad de contracción muscular y la capacidad de producir fuerza. Según la curva, la velocidad de ejecución y la fuerza muscular se relacionan de manera inversa, es decir, cuando aumenta la velocidad del movimiento disminuye la fuerza que un músculo puede producir (Brown, 2008). Por lo tanto una mayor aplicación de fuerza genera una mayor potencia, lo que se traduce en una velocidad más alta cuando se realiza un gesto deportivo (González Badillo & Gorostiaga Ayestarán, 2002).



**Figura 2. Curva de fuerza-velocidad(Brown, 2008).**

### **1.3.3 Velocidad en el ámbito deportivo**

En el ámbito deportivo la velocidad de reacción es la cualidad que tiene un deportista para realizar movimientos en el menor tiempo posible. Grosser define la velocidad como "Capacidad de conseguir, en base a proceso cognitivos, máxima fuerza y funcionalidad del sistema neuromuscular, una rapidez máxima de reacción y movimiento en determinadas condiciones establecidas". Otro autor como Frey define a la velocidad como "Capacidad que permite, en base a la movilidad de los procesos del sistema neuromuscular y de las propiedades de los músculos para desarrollar la fuerza, realizar acciones motrices en un lapso de tiempo situado por debajo de las condiciones mínimas dadas" (Morente Montero, Benitez Sillero, & Rabadán de Cos, 2013)

Para lograr tener buenos resultados en una interacción deportiva es necesario que el deportista ejecute acciones en el menor tiempo posible, puesto que el adversario intentará anticipar o evitar la ejecución de dichas acciones. En los deportes de combate y artes marciales la velocidad de ejecución es muy alta, por lo que la toma de decisiones se basa en el ritmo que impone el adversario, por ende quien tenga mayor velocidad de reacción y en la toma de decisiones tendrá mayor probabilidad de ganar (Morente Montero et al., 2013).

La velocidad de reacción es definida por Grosser como "Capacidad de reaccionar ante un estímulo en el menor tiempo posible". A su vez la velocidad de reacción incluye dos conceptos muy importantes como son el tiempo de reacción y el tiempo de ejecución o movimiento (Robles Pérez, 2014)

El tiempo de reacción puede ser definido de diferentes maneras. La primera, como el periodo latente entre un estímulo y el comienzo de movimiento físico. O la segunda como el periodo que pasa entre el inicio de un estímulo y el inicio de la respuesta que da un sujeto (Pinillos Ribalda & González Calleja, 2011).

El tiempo de ejecución o de movimiento, es el periodo en el cual se inicia la reacción motora y finaliza cuando se presenta la finalización de la ejecución prevista. En las artes marciales el tiempo de ejecución se conoce también como tiempo de ejecución técnica (Robles Pérez, 2014)

### **1.3.4 Potencia Muscular**

La potencia muscular es la cantidad de trabajo muscular realizado por unidad de tiempo o la intensidad con la cual se ejerce una fuerza (George, Fisher, & Padró, 1996). Una definición más sencilla dice que la potencia muscular es la realización de una fuerza durante un periodo mínimo de tiempo (Martínez López & Hervás García, 2002).

Bompa (2006) establece que la potencia muscular es la capacidad de ejecutar movimientos explosivos en el mínimo tiempo posible, por lo que la potencia es el resultado del producto entre la fuerza muscular y la velocidad. En los deportes de combate y artes marciales es necesario desarrollar una gran velocidad de reacción y de fuerza para lograr responder de manera adecuada a la estrategia que plantea el oponente, es por esto que el sistema energético dominante para los deportistas de combate es el anaeróbico aláctico.

El sistema anaeróbico aláctico o vía anaeróbica aláctica se refiere al metabolismo de los fosfágenos o fosfatos de alta energía, entre los cuales se encuentran por ejemplo el ATP y la fosfocreatina. La ventaja de este sistema energético es que proporciona la energía necesaria para la contracción muscular inicial y durante ejercicios explosivos, muy intensos y de poca duración. La desventaja del sistema es que tiene poca capacidad de almacenamiento por lo que solo puede sostener actividades de esfuerzo máximo durante un periodo aproximado de 10 a 15 segundos (López Chicharro, López Mojares, & Aguila Pérez, 2008)

### **1.3.5 Importancia de la aceleración en el deporte**

Los movimientos explosivos en el deporte se ven reflejados en la fuerza explosiva o potencia muscular. La potencia influye en gran medida en aquellos deportes en los cuales las acciones o gestos necesitan cambios de dirección y aceleración. En los deportes de combate y artes marciales se necesita de una gran aceleración para la obtención o desarrollo de fuerza en poco tiempo (Ortiz Cervera, 1996).

Para obtener mejores resultados en la mayoría de los deportes, lo que interesa es que el deportista incremente la velocidad de movimiento, es decir que se debe aplicar más fuerza en una menor cantidad de tiempo. Lo anterior indica que el deportista debe desarrollar una gran aceleración de tal manera que pueda aumentar su velocidad y de esta manera generar mayor fuerza explosiva o potencia muscular (Vidal Barbier, 2000).

### **1.3.6 Entrenamiento deportivo**

El entrenamiento deportivo consiste en un proceso multifacético que permite la utilización racional de los factores que influyen en desempeño del deportista basándose en ejercicios sistemáticos. El fundamento del entrenamiento deportivo está constituido por una metodología que permite realizar ejercicios físicos con objeto de conseguir el mayor desarrollo posible.

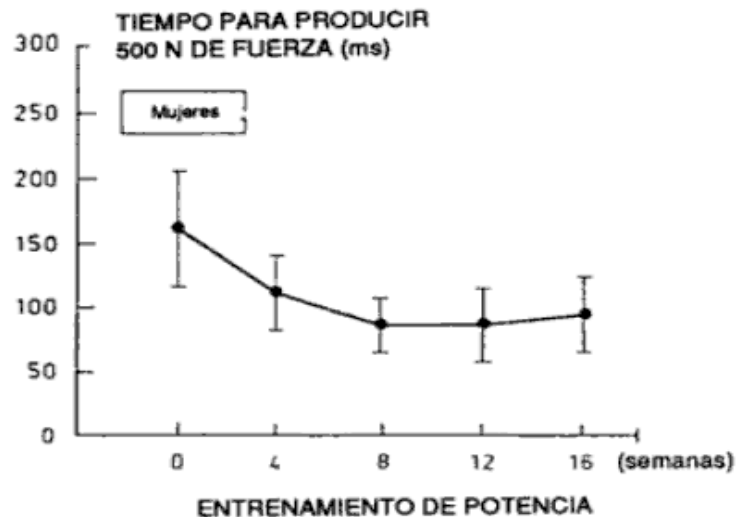
La planificación del entrenamiento permite que el deportista enfoque su preparación de acuerdo a una estrategia de mejoramiento progresivo y constructivo en el tiempo, con la finalidad de conseguir el mejor desarrollo posible de las cualidades físicas y deportivas (Campos Granell & Ramón Cervera, 2001).

Si una rutina de entrenamiento es planeada y ejecutada correctamente, se tiene como resultado del ejercicio sistemático una mejora en la condición física del deportista, particularmente en la fuerza en cuanto el cuerpo se acostumbra a una carga de trabajo (Zatsiorsky, 2006).

El entrenamiento deportivo afecta directamente y en un grado muy alto los procesos biológicos, provocando transformaciones estructurales y funcionales en el organismo. El conocimiento de la teoría y práctica del deporte permiten optimizar los procesos que garantizan una alta eficacia en el entrenamiento. El factor principal de un excelente desempeño deportivo es una carga adecuada de entrenamiento, por lo tanto la tarea principal de un entrenador es encontrar la correlación óptima entre los distintos componentes de cada una de las etapas del entrenamiento (Zhelyazkov, 2001).



Es necesario tener un plan de entrenamiento adecuado ya que si se prolonga demasiado el tiempo puede generar el fenómeno que se observa en la figura 3. En esta se representa el tiempo medio necesario para producir una fuerza de 500N en los extensores de la pierna en mujeres. Se observa que en las primeras ocho semanas hay mejoras pero empieza a empeorar a partir de la semana 12 (González Badillo & Gorostiaga Ayestarán, 2002).



**Figura 3. Tiempo necesario para generar una fuerza de 500N en los extensores de las piernas durante un ejercicio de explosión (González Badillo & Gorostiaga Ayestarán, 2002)**

### 1.3.7 Entrenamiento de la fuerza muscular

El entrenamiento de la fuerza produce cambios estructurales y fisiológicos en el cuerpo que se denominan adaptaciones. El nivel de las adaptaciones se puede evidenciar en el tamaño y definición del músculo. Todos los programas de entrenamiento de la fuerza deben cumplir con unas leyes para asegurar que el deportista realiza una adaptación de manera correcta y disminuir el riesgo de lesiones.

- Primera ley: Desarrollo de la flexibilidad articular

Los entrenamientos de fuerza utilizan toda la amplitud de movimientos de las articulaciones principales. Una buena flexibilidad de las articulaciones evita la generación de lesiones, esguinces y dolores.

- Segunda ley: Desarrollo de la fuerza en los tendones y ligamentos

La fuerza muscular se desarrolla más rápido que la fuerza de los tendones y ligamentos, por lo que un entrenamiento con un nivel alto de carga puede llevar a sufrir lesiones. El entrenamiento de los tendones y ligamentos produce un aumento en su tamaño, lo que incrementa su capacidad para soportar tensiones.

- Tercera ley: Desarrollo de la fuerza del tronco

Muchas de las lesiones en deportistas se presentan en la zona lumbar, esto se debe principalmente a un desarrollo muscular deficiente en los músculos abdominales y músculos de la espalda. Estos músculos son muy importantes para el movimiento de las caderas y las piernas, de ahí su importancia para lograr un buen desempeño en la mayoría de los deportes.

- Cuarta ley: Desarrollo de los músculos estabilizadores

Los músculos estabilizadores son aquellos que limitan o impiden el movimiento de un músculo para que otro pueda actuar. El desarrollo equivocado de estos músculos dificulta la actividad de los músculos principales y pueden producirse lesiones. Para el entrenamiento de los músculos estabilizadores se realizan ejercicios con la aplicación de una resistencia o fuerza que va en sentido contrario al movimiento.

- Quinta ley: Entrena los movimientos, no los músculos aisladamente

El propósito del entrenamiento de la fuerza en el deporte es el de estimular la habilidad. Las habilidades deportivas son movimientos de una o varias articulaciones que se realizan en un orden determinado. Cuando el deportista ejecuta un movimiento, los músculos se integran y se fortalecen para realizar con mayor potencia, es por esto que los ángulos y posición del cuerpo deben parecerse a los de las técnicas de cada deporte.

El programa de entrenamiento para aumentar la fuerza muscular consiste en emplear resistencias elevadas y acciones musculares máximas con un número de repeticiones bajo, por lo tanto la intensidad de cada ejercicio es relativamente alta. Con este tipo de entrenamiento se busca el aumento de la masa muscular, producido por la hipertrofia de las fibras musculares (T.O. Bompa, 2006).

### **1.3.8 Entrenamiento de la velocidad de reacción**

Para mejorar la velocidad de reacción un deportista puede utilizar los siguientes métodos:

- Reacciones repetidas: Se basa en estimular al sujeto al momento de emitir una señal, que puede ser tanto auditiva como visual, o bien cambiando las condiciones en la que se ejecuta el ejercicio. De esta manera el deportista se anticipa y reacciona de forma diferente ante estímulos conocidos o los movimientos del adversario.
- Métodos analíticos: Se refiere a la ejecución de una destreza o movimiento técnico bajo unas determinadas condiciones favorables, lo que facilita la reacción o velocidad de respuesta ante una señal.
- Método sensoriomotor: En este método se relaciona el tiempo de reacción y la capacidad de distinguir pequeños intervalos de tiempo, es decir que se busca que el deportista pueda medir breves periodos de tiempo y de esta manera aprenda a dirigir su tiempo de reacción.

Los métodos mencionados anterior mente se consideran muy efectivos para mejorar la velocidad de reacción que necesita una respuesta simple, esto quiere decir que el deportista debe ejecutar los mismos movimientos cuando percibe un estímulo o señal. En los deportes de combate se requiere de acciones diferentes ante varios estímulos por eso se recomiendan los métodos que exigen una respuesta compleja; como son:

- **Reacción frente a un objeto en movimiento:** Es un método típico para los deportes de equipo y en los cuales se enfrentan un par de adversarios. Se realizan ejercicios para mejorar la capacidad de percibir la dirección y velocidad con la que se mueve un objeto, seleccionar un plan de acción y finalmente ejecutarlo. Por ejemplo ejercicios como lanzar un objeto a posiciones y velocidades inesperadas, y reducir el espacio o campo de acción mejoran la reacción.
- **Reacción selectiva:** Es la capacidad de seleccionar, frente a varias posibilidades, la respuesta motora más adecuada ante las acciones de un adversario o las condiciones del ambiente donde se está compitiendo. Este método se debe entrenar de manera gradual puesto que el deportista inicialmente debe aprender los movimientos estándar al estar en una situación específica, posteriormente debe aprender las variaciones de esos movimientos, cuando el entrenador añade suficiente elementos, entonces el deportista debe estar en capacidad de escoger el movimiento o la técnica correcta durante la competencia (Tudor O Bompá, Enseñat Sole, & Blanco, 2003)

### **1.3.9 Entrenamiento de la potencia muscular**

La potencia muscular se puede medir de las siguientes maneras:

1. **Magnitud de la resistencia:** Expresa un porcentaje del mejor desempeño logrado por el deportista.
2. **Numero de repeticiones por serie:** Indica el número de repeticiones de un ejercicio que se realiza de manera consecutiva.
3. **Número o porcentaje de repeticiones con resistencia máxima:** Indica el número de repeticiones, o el porcentaje de una sola acción, que realiza un deportista con la carga máxima.

Para mejorar la potencia muscular el deportista y su entrenador pueden emplear los siguientes métodos:

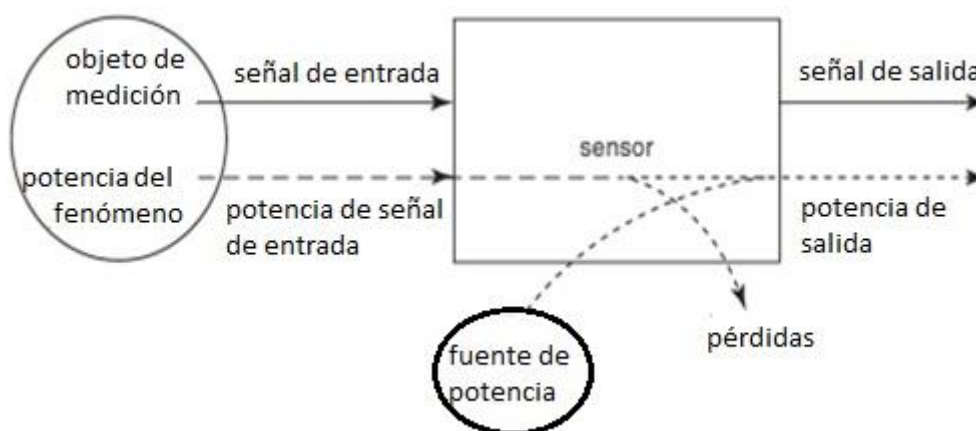
- **Método del esfuerzo máximo:** Es muy utilizado para incrementos de fuerza significativos y mejora la coordinación del sistema nervioso central con el músculo debido a que se reclutan una gran cantidad de unidades motoras. El método consiste en hacer el mayor número series con la carga máxima, por lo que se recomiendan un máximo de 3 repeticiones por serie.
- **Método del esfuerzo repetitivo:** Consiste en realizar repeticiones hasta llegar a la fatiga muscular. Entre sus ventajas principales están el favorecimiento de la

hipertrofia debido a que aumenta el metabolismo muscular y el deportista es menos propenso a lesiones puesto que no trabaja con una carga muy alta.

- Método del esfuerzo dinámico: El deportista realiza ejercicios con una carga media pero a gran velocidad. Se utiliza para mejorar la fuerza explosiva y el tiempo que le deportista tarda en desarrollar su fuerza máxima (Zatsiorsky, 2006).

### 1.3.10 Sensores

Un sensor es un dispositivo que provee una salida o cantidad eléctrica en respuesta a la medición de una variable física específica (Patranabis, 2004). La figura 4 describe el modo de operación general de un sensor en el que el fenómeno de interés genera una señal de entrada para el sensor y este, gracias a sus componentes internos, lo transforma en una señal eléctrica para su posterior medición e interpretación.



**Figura 4. Esquema general del funcionamiento de un sensor (Meijer, 2008).**

De acuerdo al tipo de energía de entrada y salida, existen tres tipos de sensores: modificadores, generadores y moduladores (Patranabis, 2004; Webster & Eren, 2014). En los modificadores, un tipo particular de energía se modifica, lo que permite que ese mismo tipo de energía esté en la entrada y la salida del sensor. En los sensores generadores, se produce una señal eléctrica con una entrada no eléctrica y no requiere energías externas para su funcionamiento. Finalmente, los sensores moduladores producen una señal eléctrica con una entrada no eléctrica, pero a diferencia de los generadores, estos sí necesitan una alimentación de energía externa (Webster & Eren, 2014).

Generalmente se debe hacer un acondicionamiento a las señales obtenidas de los sensores por medio de los acondicionadores de señal, que son elementos del sistema de medición que permiten obtener una señal apta para ser procesada. Principalmente consisten en circuitos electrónicos que permiten realizar funciones como amplificación, filtrado, adaptación de impedancias, modulación, etc (Pallás Areny, 2003).

El número de sensores que existe para medir diferentes magnitudes físicas es muy elevado por lo que es necesaria una clasificación. Para dicha clasificación se utilizan distintos criterios como el aporte de energía, señal de salida o la magnitud de medida, sin embargo el criterio más utilizado desde el punto de vista de la ingeniería electrónica es de acuerdo con el parámetro variable (resistencia, capacidad, inductancia), debido a que permite un mejor estudio de los acondicionadores de señal requeridos (Pallás Areny, 2003).

Las celdas de carga, generalmente se utilizan en estructuras rígidas para la medición de fuerzas y esfuerzos aplicados. Las celdas son capaces de medir variaciones de fuerzas con una pequeña desviación y buena precisión. La precisión típica de las celdas es del orden del 0,1%. Varias estrategias son aplicadas para la medición de las fuerzas y están relacionadas con los diferentes diseños de las celdas. Existen de varios tipos como las hidráulicas, las strain gauges, las de forma de anillo, las piezoeléctricas, etc (Webster & Eren, 2014).

El acelerómetro es un sensor usado para la medición directa de los cambios de aceleración. Existen tres tipos de acelerómetros: strain gauges, piezorresistivo y piezoeléctrico. Los acelerómetros piezoeléctricos suelen tener una respuesta a las frecuencias más elevada que los strain gauges, pero no tienen una verdadera respuesta estática, es por esto que no es recomendado usarlos para obtener datos de movimientos lentos o periodos de inactividad. Este dispositivo está disponible para mediciones uniaxiales o en tres direcciones ortogonales, su calibración depende del tipo de acelerómetro que se va a usar, por ejemplo los strain gauge y los piezorresistivos se calibran alineándose con el campo gravitacional mientras que los piezoeléctricos requieren de técnicas dinámicas para su calibración adecuada (Robertson, 2014).

### 1.3.11 Dispositivos automatizados

Para lograr medir las capacidades de los deportistas de una manera muy precisa y diseñar un plan de entrenamiento adecuado y óptimo para cada persona en particular, es necesario utilizar dispositivos automatizados que son aquellos que utilizan tecnologías de información y comunicación, utilizando elementos de carácter tecnológicos que permiten darle un mejor manejo de la información (Sánchez Garreta, 2003).

Cualquier dispositivo automatizado debe tener al menos los siguientes componentes:

- **Datos:** Son los registros de los hechos en una base de datos informatizada.
- **Información:** Es el conjunto de los datos obtenidos y procesados por un software, con el fin de desarrollar una actividad o tomar una decisión.
- **Personas:** En este componente se consideran tanto las personas que ejercen como usuarios directos del sistema, como los usuarios finales que son quienes reciben la información.

- **Procedimientos:** Son las indicaciones sobre cómo se deben realizar los procesos por cada una de las personas involucradas.
- 
- **Hardware y Red de comunicaciones:** Consiste en todo el equipamiento físico del sistema y los dispositivos que permiten intercambio de comunicación.
- **Software:** Consiste en el programa que controla el hardware y el sistema de información (Sánchez Garreta, 2003).

## 2. METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos propuestos se dividió el proyecto en las siguientes etapas:

1. Selección de transductores y dispositivos:

- a. Proceso de diseño.
- b. Selección de elementos.

Para el proceso de diseño y selección de los elementos a utilizar se usó la metodología del diseño de concepto, siguiendo los pasos descritos por Ulrich y Eppinger. Para esta etapa fue necesario identificar las necesidades, listar las posibles soluciones y hacer una evaluación cuantitativa de estas para elegir la solución más adecuada para las necesidades planteadas (Ulrich & Eppinger, 2009).

2. Construcción del sistema de instrumentación:

- a. Diseño y desarrollo de circuitos eléctricos.
- b. Desarrollo del software.
- c. Diseño y construcción de la estructura física.
- d. Calibración del dispositivo.

Para el diseño y la simulación de los circuitos eléctricos se utilizó el software de Labcenter Electronics, Proteus, para tener una idea de su funcionamiento antes de proceder a las pruebas de laboratorio donde se comprobó su buen funcionamiento. Finalmente se desarrollaron las tarjetas de circuito impreso (PCB por sus siglas en inglés).

En el desarrollo del software se creó una interfaz gráfica de usuario, con el software de National Instruments, LabVIEW, para la visualización de resultados y control de dispositivos periféricos necesarios para el funcionamiento adecuado del sistema de instrumentación.

La estructura física se diseñó con el software de Siemens, Solid Edge ST6, con el que además se simuló, por medio de análisis por elementos finitos (FEA), el comportamiento mecánico de la estructura cuando se aplicaban las cargas para las que está diseñada la estructura. Para la construcción de la estructura se utilizó acero ASTM A36 y se usó el método de soldadura por arco de gas protector (GMAW) ya que es un método fácil de aplicar y relativamente económico en comparación con otros métodos (Kalpakjian, Schmid, & Sánchez García, 2002).

Finalmente, para la calibración del dispositivo se programó un protocolo de evaluación en la máquina de ensayos universales, Instron 3345. En la evaluación se aplicó una serie de cargas conocidas y se midió la respuesta eléctrica del dispositivo para realizar

la curva de calibración carga-voltaje y generar la ecuación correspondiente por medio de una regresión lineal.

3. Evaluación de desempeño del sistema construido:

- a. Desarrollo de protocolo de evaluación.
- b. Pruebas de campo.



### 3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DISPOSITIVO

#### 3.1 SELECCIÓN DE TRANSDUCTORES Y DISPOSITIVOS

##### 3.1.1 Proceso de diseño

- **Identificación de las necesidades**

Para establecer los requerimientos del dispositivo se realizó una revisión bibliográfica que permitió determinar cuáles eran las aptitudes físicas más importantes para un deportista de combate. Luego de leer los conceptos de varios autores se pudo determinar que la fuerza, la velocidad y la resistencia son las aptitudes más influyentes en el rendimiento de un deportista en general. Uno de los conceptos más importantes es el de Tudor Bompa, reconocido experto mundial en el entrenamiento deportivo, quien en su libro “Periodización del entrenamiento deportivo” afirma que *“La fuerza, la velocidad y la resistencia desempeñan un papel importante en la consecución de rendimiento y reciben el nombre de cualidades motrices dominantes”* (T.O. Bompa, 2006).

En el caso particular de un deportista de combate o artista marcial, la fuerza y la velocidad son las aptitudes dominantes, es decir que tienen mayor influencia en el rendimiento que la resistencia (T.O. Bompa, 2006).

En la mayoría de los deportes es necesario que la persona genere la mayor cantidad de fuerza en el menor tiempo posible, esto se consigue aumentando la velocidad del movimiento, es decir que se debe tener gran capacidad de aceleración (Vidal Barbier, 2000).

En los deportes de combate el concepto de velocidad se refiere a la rapidez con la cual el deportista ejecuta el movimiento. Sin embargo, Ortíz (1996) señala que en los deportes de combate se necesita de una gran aceleración para desarrollar fuerza en poco tiempo y de esta manera ejecutar movimientos explosivos (Ortíz Cervera, 1996).

Otro autor como Morente Montero (2013) dice que para lograr tener buenos resultados en una interacción deportiva es necesario que el deportista ejecute acciones en el menor tiempo posible, puesto que el adversario intentará anticipar o evitar la ejecución de dichas acciones (Morente Montero et al., 2013).

Los conceptos anteriores indican que para un deportista de combate la capacidad de aumentar la velocidad de movimiento es determinante para un buen desempeño, es decir que su capacidad de aceleración es más influyente que la velocidad con la cual realiza un gesto. Por lo tanto se considera que la medición de la aceleración del golpe tiene mayor importancia que la de velocidad.

Luego de establecer las aptitudes más importantes se continuó con un análisis que permitiera definir cuáles de estas podían ser cuantificadas mediante un sistema de instrumentación y ser procesados por un dispositivo automatizado. A continuación se muestran los requerimientos con los cuales debía cumplir el dispositivo.

- Medir la fuerza de un golpe de un deportista de combate
- Medir la aceleración de un golpe de un deportista de combate
- Medir la velocidad de reacción de un deportista de combate
- Medir la cantidad de golpes realizados en 10 segundos por un deportista de combate
- Visualizar resultados
- Fácil procesamiento de datos
- Que sea resistente
- Que sea cómodo para el usuario
- Que sea fácil de instalar

#### ○ **Soluciones**

Teniendo en cuenta las necesidades identificadas se propuso la siguiente lista de soluciones.

- Celdas de carga
- Flexiforce
- Medir desplazamiento de resortes
- Acelerómetro
- Barreras de luz
- Sensores de efecto Hall
- Estímulo visual
- Diseño de software básico
- Plataforma Arduino
- Microcontroladores
- Materiales que resistan fuertes impactos
- Sistema de amortiguación

- Transmisión por Bluetooth
- Transmisión por XBee
- Transmisión por radiofrecuencia (RF)
- Pequeñas dimensiones
- Fijación mecánica

En la tabla 1 se observa la relación de las soluciones planteadas con las necesidades identificadas.

**Tabla 1. Matriz de necesidades-soluciones**

	Medir fuerza	Medir Aceleración	Medir velocidad de reacción	Visualización de resultados	Procesamiento de datos	Resistente	Cómodo	Fácil de usar	Fácil de instalar
Celdas de carga									
Flexiforce									
Desplazamiento de resortes									
Acelerómetro									
Barrera de luz									
Sensores de efecto Hall									
Estímulo visual									
Diseño de software e interfaz									
Plataforma Arduino									
Microcontrolador									
Materiales que resistan fuertes impactos									
Sistema de amortiguación									
Transmisión por Bluetooth									

Transmisión por XBee									
Transmisión por RF									
Pequeñas dimensiones									
Fijación mecánica									

## ○ **Especificaciones**

Se realizó la revisión bibliográfica consultando valores de fuerza y velocidad en otros estudios realizados. Se encontró que en promedio la fuerza está entre 1000N y 4000N (Chadli, Ababou, & Ababou, 2014).

- Rango de fuerza: 1000 N a 4000 N
- El dispositivo debe resistir un impacto mínimo de 4000 N
- Rango de aceleración: Máximo 70 g.
- Transmisión inalámbrica

Esta especificación se definió pensando que de esta manera el usuario podría realizar el gesto deportivo de una manera más natural y cómodo, ya que el uso de cables puede alterar el movimiento normal.

- Distancia de transmisión: Mínimo 5 m
- PC: Windows 7 o superior

## ○ **Caja negra**

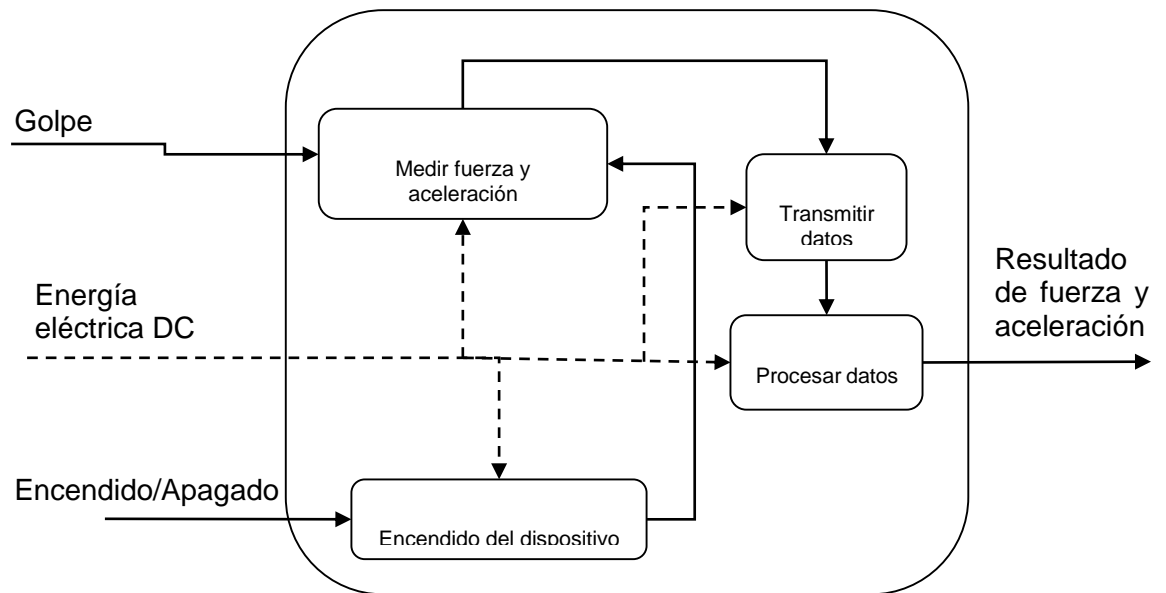
La estructura de la caja negra es un diagrama en el que se representa la solución como una caja negra que tiene variables de entrada definidas y tiene unas salidas que corresponden con las necesidades planteadas (Ulrich & Eppinger, 2009). En la figura 5 se muestra el diagrama de caja negra para el dispositivo desarrollado. Este tiene como variables de entrada la energía de alimentación eléctrica, y las señales de encendido y apagado y el golpe como objeto de medición. A la salida del diagrama se encuentran las medidas de fuerza y aceleración del golpe.



**Figura 5. Caja negra del diseño del dispositivo**

○ **Caja transparente**

En el diseño de concepto, el diagrama de caja transparente permite ver las funciones de la solución que se encargan de transformar las entradas de la caja negra en las salidas que se obtienen. Es por esto que ambos diagramas tienen los mismos parámetros de entrada y salida (Ulrich & Eppinger, 2009). Para el dispositivo desarrollado se tiene el diagrama que se muestra en la figura 6, este tiene como funciones principales controlar el encendido y apagado, medir las variables de interés, transmitir y procesar los datos obtenidos.








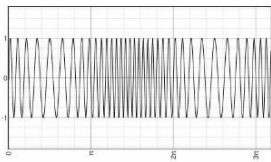









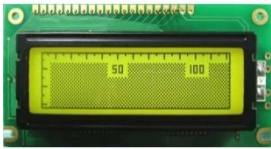
**Figura 6. Caja transparente del diseño del dispositivo**

En la tabla 2 se presentan las diferentes opciones para satisfacer adecuadamente las necesidades. Luego, en la tabla 3, se encuentran las definiciones de las soluciones propuestas.



**Tabla 2. Matriz morfológica de soluciones**

Funciones	Soluciones		
	1	2	3
Medir fuerza	<p>Celda de carga</p> 	<p>Flexiforce</p> 	<p>Resortes (Ley de Hooke)</p> 
Medir aceleración	<p>Acelerómetro</p> 	<p>Barrera de luz</p> 	<p>Efecto Hall</p> 
Estímulo visual	<p>Matriz de LEDs</p> 		
Transmitir datos	<p>RF</p> 		<p>XBee</p> 
Procesar datos		<p>Microcontrolador</p> 	
Software e interfaz gráfica			

Mostrar resultados	<p>Computador</p> 	<p>LCD</p> 	
--------------------	---	---	--

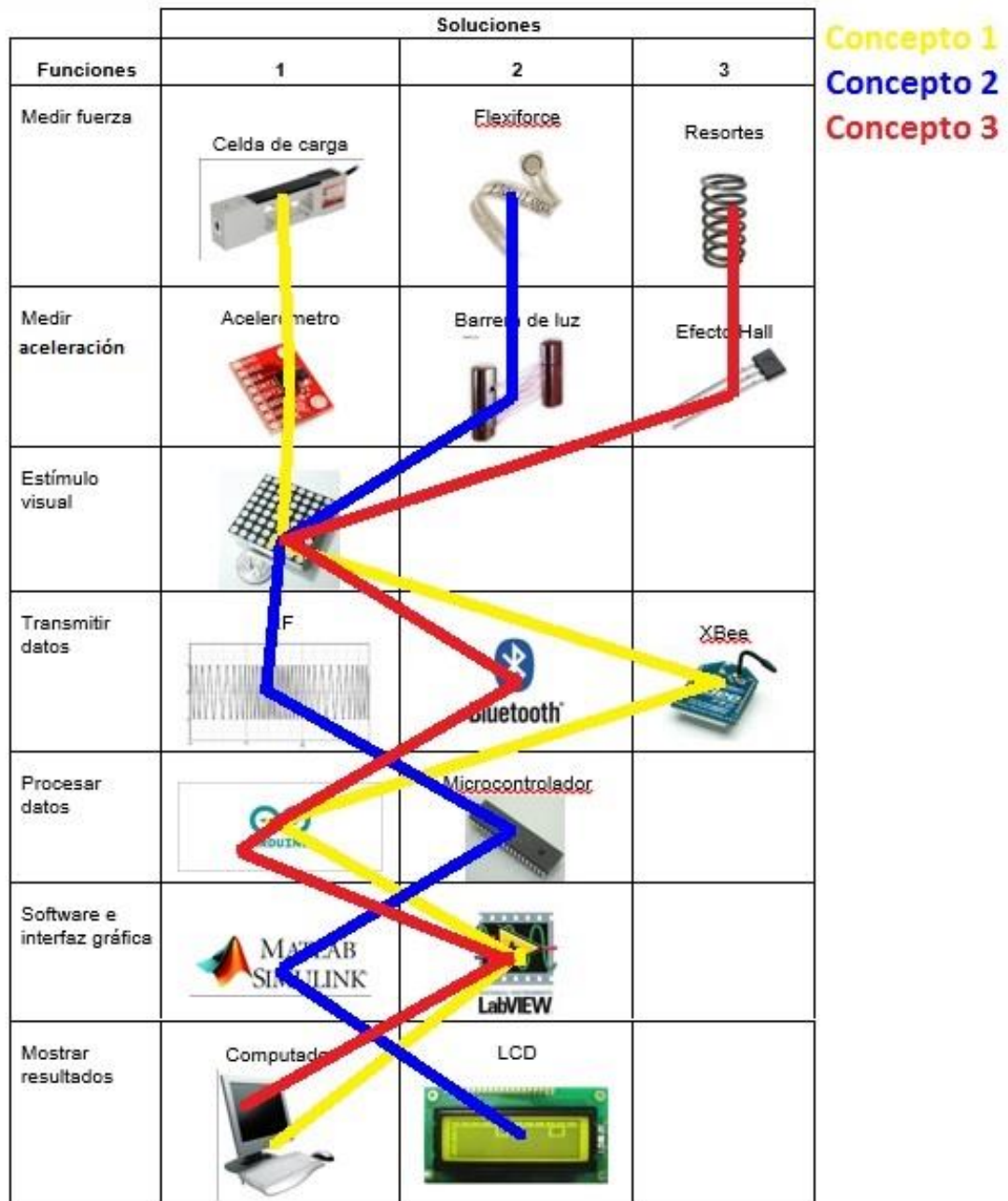
**Tabla 3. Registro de soluciones**

<b>Solución</b>	<b>Definición</b>
Celda de carga	Instrumento capaz de medir variaciones de fuerzas con una pequeña desviación, buena precisión (aproximadamente 0.1%) y rango de medida variable de acuerdo al tipo de celda.
Flexiforce	Sensor de presión y fuerza de bajo costo capaz de medir hasta 100lb (440N).
Resortes	Cálculo de fuerza por medio de la medición del desplazamiento del resorte usando la ley de Hooke.
Acelerómetro	Dispositivo que permite medir la aceleración en direcciones ortogonales.
Barreras de luz	Medición de velocidad contando el tiempo entre las interrupciones de luz de dos barreras a una distancia conocida.
Sensor de efecto Hall	Cálculo de velocidad midiendo el tiempo de acercamiento de un imán en el puño del usuario por medio del efecto Hall.
Matriz de LEDs	Arreglo de LEDs en filas y columnas. Pueden ser de un color o más de uno.
Radiofrecuencia	Método que consiste en la conversión de señales eléctricas a energía electromagnética para ser propagadas de manera inalámbrica (Tomasi, Mata Hernández, & García Bisogno, 2003)
Bluetooth	Protocolo de transmisión de datos por medio de radiofrecuencias.
XBee	Dispositivo de transmisión inalámbrica por radiofrecuencias producido por Digi International.
Arduino	Plataforma de hardware libre basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo.

Microcontrolador	Circuito integrado programable capaz de ejecutar las órdenes grabadas en su memoria.
Matlab	MATrix LABoratory: Herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio. Desarrollado por MathWorks.
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench: Plataforma y entorno de desarrollo para diseñar sistemas, con un lenguaje de programación visual gráfico. Desarrollado por National Instruments.
Computador	Máquina que permite recibir, procesar y visualizar información.
LCD gráfico	Pantalla de cristal líquido que permite mostrar gráficas.

○ **Conceptos solución**

En la figura 7 se muestran los diferentes conceptos que se plantean para el desarrollo del dispositivo-



**Figura 7. Conceptos solución**

○ **Matriz de calificación**

Para esta etapa del diseño se definieron los parámetros que se considera que son importantes que el dispositivo cumpla. A cada parámetro se le asignó un valor porcentual teniendo en cuenta su importancia para el adecuado funcionamiento. Los siguientes fueron los parámetros definidos con su respectivo peso.

**Funcionalidad (10%):** El dispositivo es capaz de tomar medidas reales de fuerza y aceleración.

**Precisión en la medida (20%):** Las mediciones que realiza el equipo se acercan a la realidad.

**Comodidad del usuario (15%):** El dispositivo debe permitirle al usuario realizar los gestos necesarios de una manera natural.

**Fácil de operar (15%):** La complejidad de manejo del dispositivo debe ser relativamente baja. Para esto se puede desarrollar una interfaz intuitiva, con pocos comandos y gráficas comprensibles.

**Visualización cómoda de resultados (15%):** Los resultados deben presentarse de una manera que sea fácil de leer y entender para el usuario.

**Costos de materiales para construcción (15%):** Se busca que los materiales de construcción sean relativamente económicos.

**Acoplamiento simple (10%):** Las partes de hardware y software se deben ensamblar fácilmente.

Luego, se realizó la evaluación de los conceptos propuestos y los resultados se observan en la tabla 4. Basándose en los componentes elegidos para cada concepto, se dio una calificación de 0 a 5 para cada uno de los parámetros mencionados, donde 0 significa que no lo cumple y 5 que lo cumple completamente. Finalmente, se multiplicaron estos resultados por el valor porcentual de cada parámetro, se sumaron y se obtuvo la calificación total del concepto que también se encuentra entre 0 y 5.

**Tabla 4. Matriz de calificación**

		Conceptos					
Criterios de selección		C1		C2		C3	
	Peso %	Calif	Pond	Calif	Pond	Calif	Pond
Funcionalidad	10	5	0.5	4	0.4	4	0.4
Precisión en la medida	20	5	1	3	0.6	4	0.8
Comodidad del usuario	15	4	0,6	2	0,3	4	0,6
Fácil de operar	15	5	0,75	2	0,3	4	0,6
Visualización de resultados	15	5	0,75	3	0,45	5	0,75
Costo de materiales	15	3	0.45	4	0.6	4	0.6
Acoplamiento simple	10	4	0.4	3	0.3	2	0.2
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>4.45</b>		<b>2.95</b>		<b>3.95</b>	

Finalizada la evaluación, se observa que el concepto ganador es el concepto 1 con una calificación de 4.45.

### 3.1.2 Selección de elementos

Basándose en la evaluación de los criterios, se seleccionó el concepto que cumple con los siguientes parámetros:

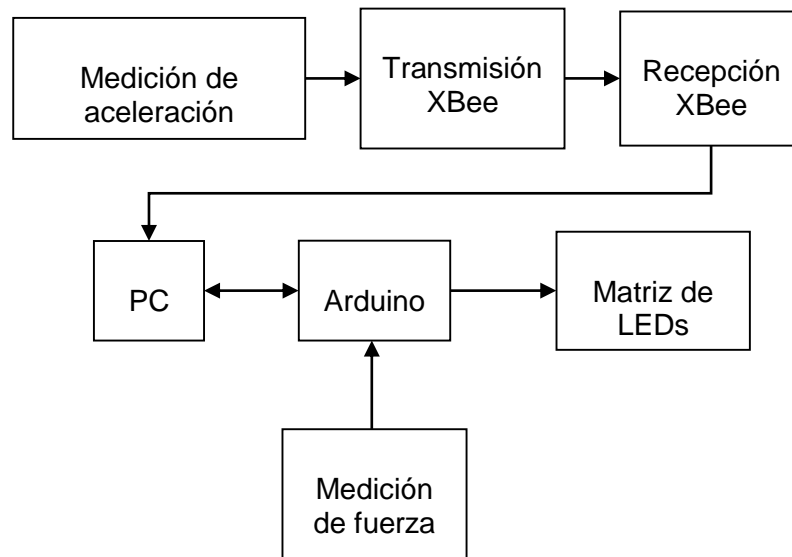
- Medición de fuerza: Celda de carga.
- Medición de aceleración: Acelerómetro de tres ejes.
- Estímulo visual: Matriz de LEDs.
- Método de transmisión: Módulos XBee.
- Procesamiento de datos: Arduino.
- Software e interfaz gráfica: LabVIEW.
- Mostrar resultados: Computador.

## 3.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN

### 3.2.1 Diseño y desarrollo de circuitos eléctricos

El diseño básico de los circuitos consiste en la adquisición de las señales y su transmisión al Arduino o al computador para su visualización (figura 8). El acondicionamiento de las

señales se realizó filtrando y amplificando las señales que sean necesarios para tener una medición adecuada.



**Figura 8. Diagrama de bloques de los circuitos eléctricos**

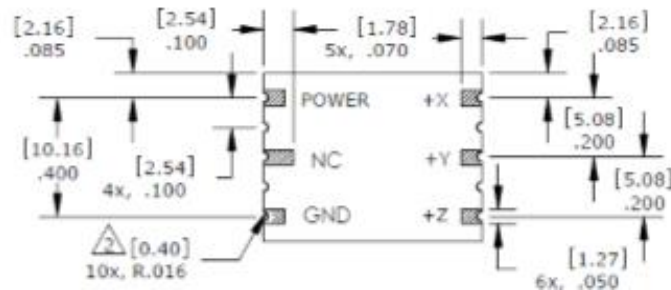
○ **Medición de aceleración**

Para la medición de aceleración se seleccionó el acelerómetro de referencia 832M1-0100. Este acelerómetro de montaje superficial, mide en tres ejes de movimiento ortogonales y genera un voltaje análogo de acuerdo a la aceleración a la que es sometido y puede medir hasta 100 unidades de gravedad de acuerdo a los fabricantes (Measurement specialties, 2013).



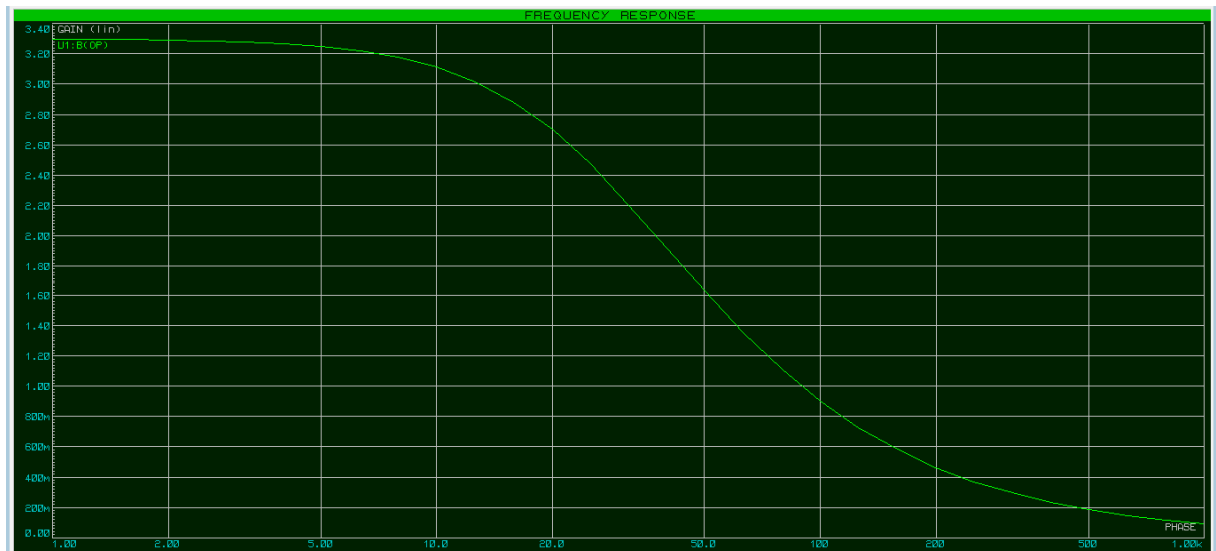
**Figura 9. Acelerómetro 832M1-100 de Measurement Specialties.**

La figura 10 muestra la configuración de las conexiones eléctricas y las dimensiones del sensor.



**Figura 10. Dimensiones y conexiones del acelerómetro 832M1-100 según fabricante.**

Para el circuito de acondicionamiento del acelerómetro fue necesario hacer una amplificación y un filtrado. Para la amplificación se consideró que el voltaje máximo de entrada para los módulos de transmisión es de 3.3V. Para el filtrado se diseñó un filtro activo pasa bajas de primer orden con frecuencia de corte en 30Hz con el fin de eliminar ruidos externos al circuito. La simulación del acondicionamiento se observa en la figura 11.



**Figura 11. Simulación de acondicionamiento del circuito de aceleración.**

Para la transmisión de los datos se utilizaron los módulos XBee S1 configurados como se muestra en la figura 12. El módulo de recepción se conectó directamente al computador por medio de un circuito adaptador a USB.



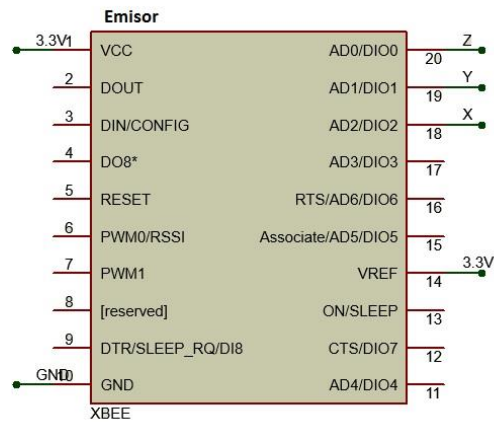


Figura 12. Configuración del módulo XBee emisor.

### ○ Medición de fuerza

Para la medición de la fuerza se utilizaron 4 celdas de carga S250LB con capacidad de medición de 250 lb (aproximadamente 110 kg) cada una. Las conexiones se hacen de acuerdo al código de colores donde negro se conecta a la fuente de alimentación negativa, azul a la fuente de alimentación positiva y los cables rojo y blanco corresponden, respectivamente a las señales positiva y negativa de salida que varían dependiendo de la fuerza aplicada.

Se utilizaron amplificadores de instrumentación para dar una ganancia aproximada de 100 y diferenciar las señales. Además se realizó un filtro activo pasa bajas de primer orden con frecuencia de corte en 30Hz. La simulación del acondicionamiento se observa en la figura 13.

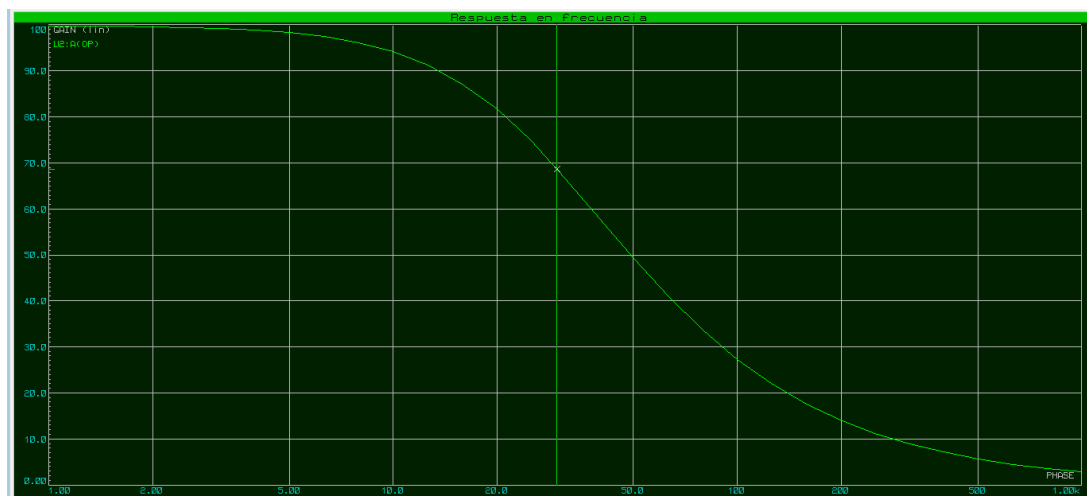
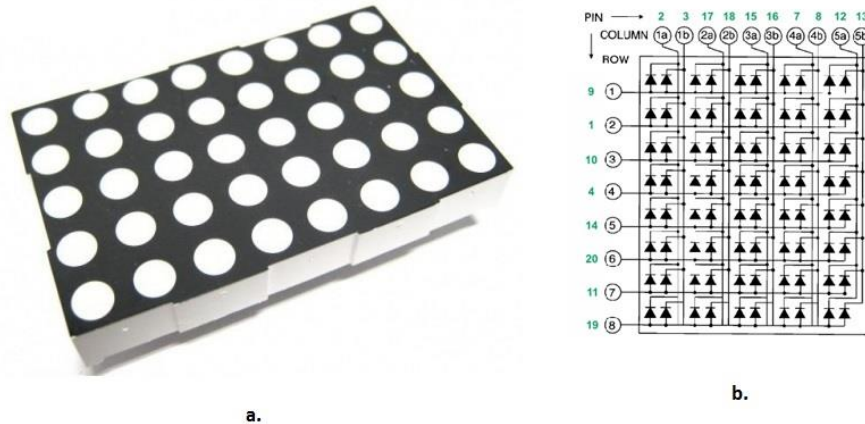


Figura 13. Simulación de acondicionamiento del circuito de fuerza.

○ **Matriz de LEDs**

Se utilizó una matriz de 8x5 con LEDs rojos y verdes (figura 14a.) como estímulo visual para medir la velocidad de reacción del usuario contabilizando el tiempo entre el cambio de color de iluminación (rojo a verde) y la ejecución de un golpe. Las conexiones de la matriz se muestran en la figura 14b.



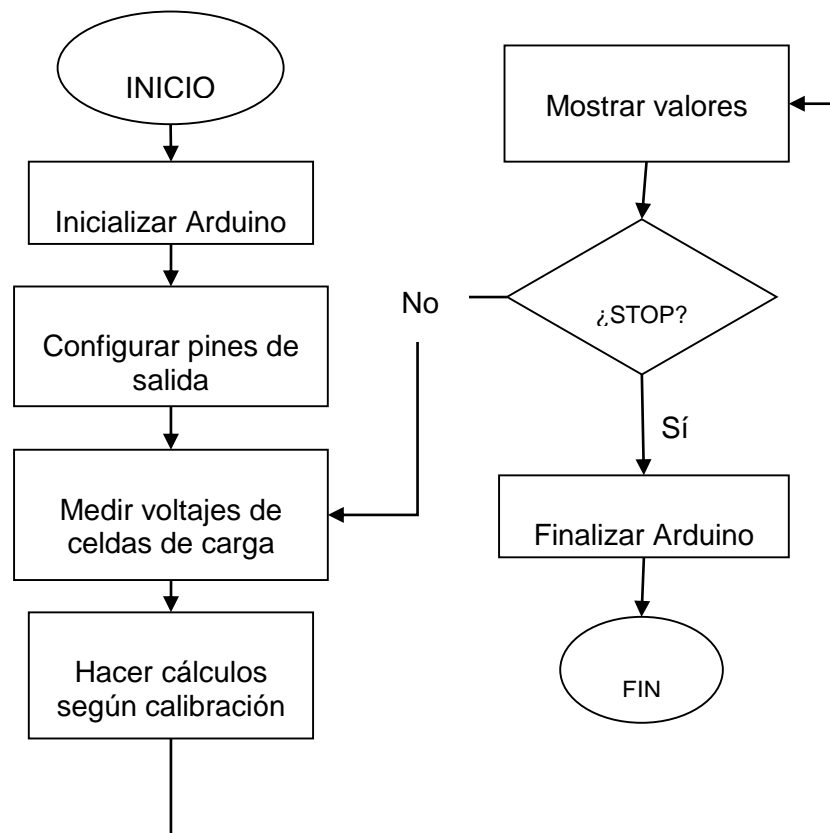
**Figura 14. a) Matriz de LEDs. b) Diagrama de conexiones.**

### 3.2.2 Desarrollo del software

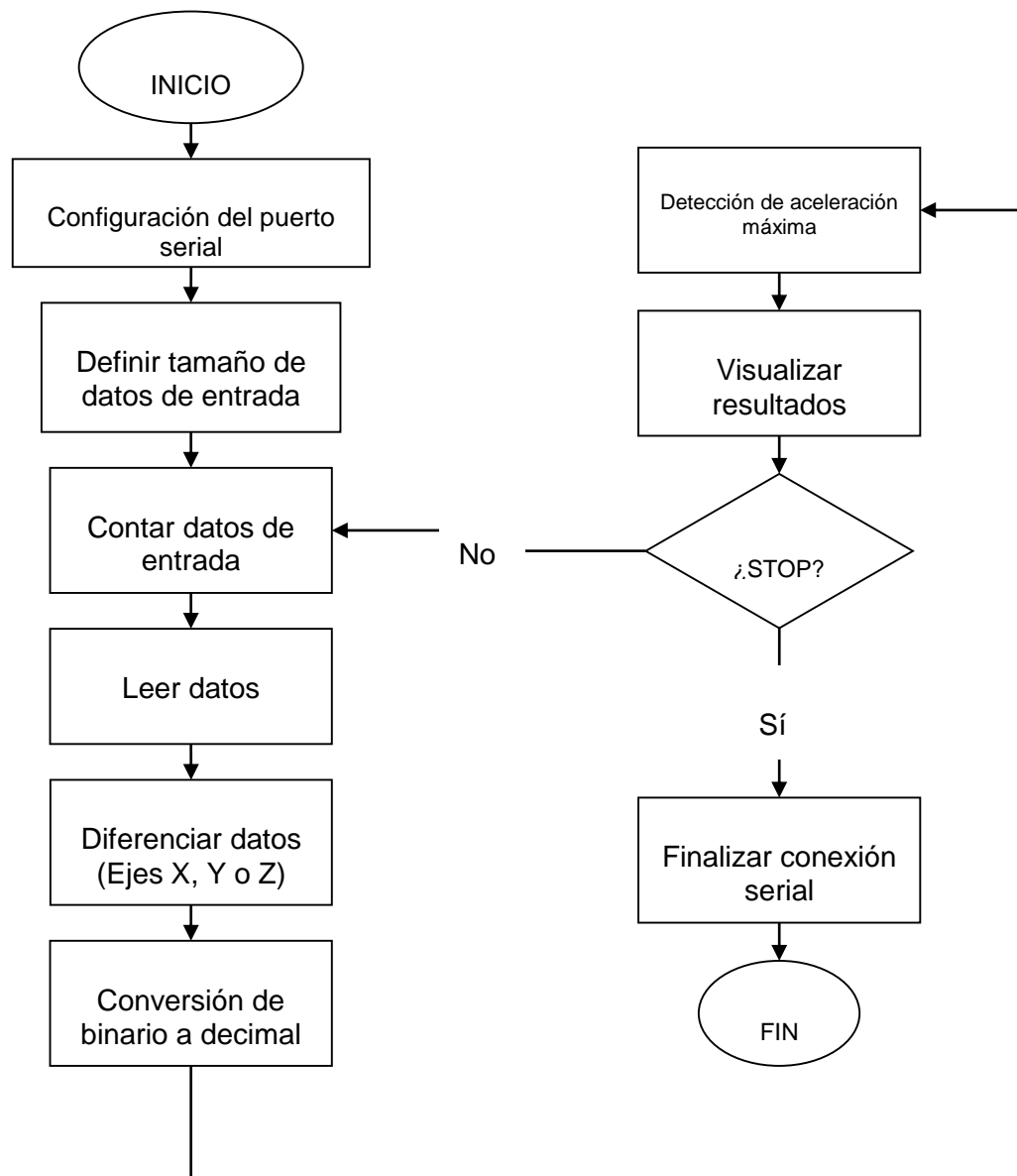
El software se realizó usando el programa LabVIEW y tiene tres modalidades de uso; medición de fuerza y aceleración, tiempo de reacción a un estímulo visual y conteo de golpes en un intervalo de 10 segundos.

○ **Medición de fuerza y aceleración**

El programa de fuerza y aceleración se dividió en dos partes. En la figura 15 se observa el diagrama de flujo del programa para la medición de la fuerza. Y en la figura 16 se muestra el diagrama de flujo del programa para la medición de la aceleración.



**Figura 15. Diagrama de flujo para el programa de medición de fuerza.**



**Figura 16. Diagrama de flujo para el programa de medición de aceleración.**

#### ○ **Velocidad de reacción**

A continuación se presenta el diagrama de flujo para el programa encargado de la medición de la velocidad de reacción (figura 17).

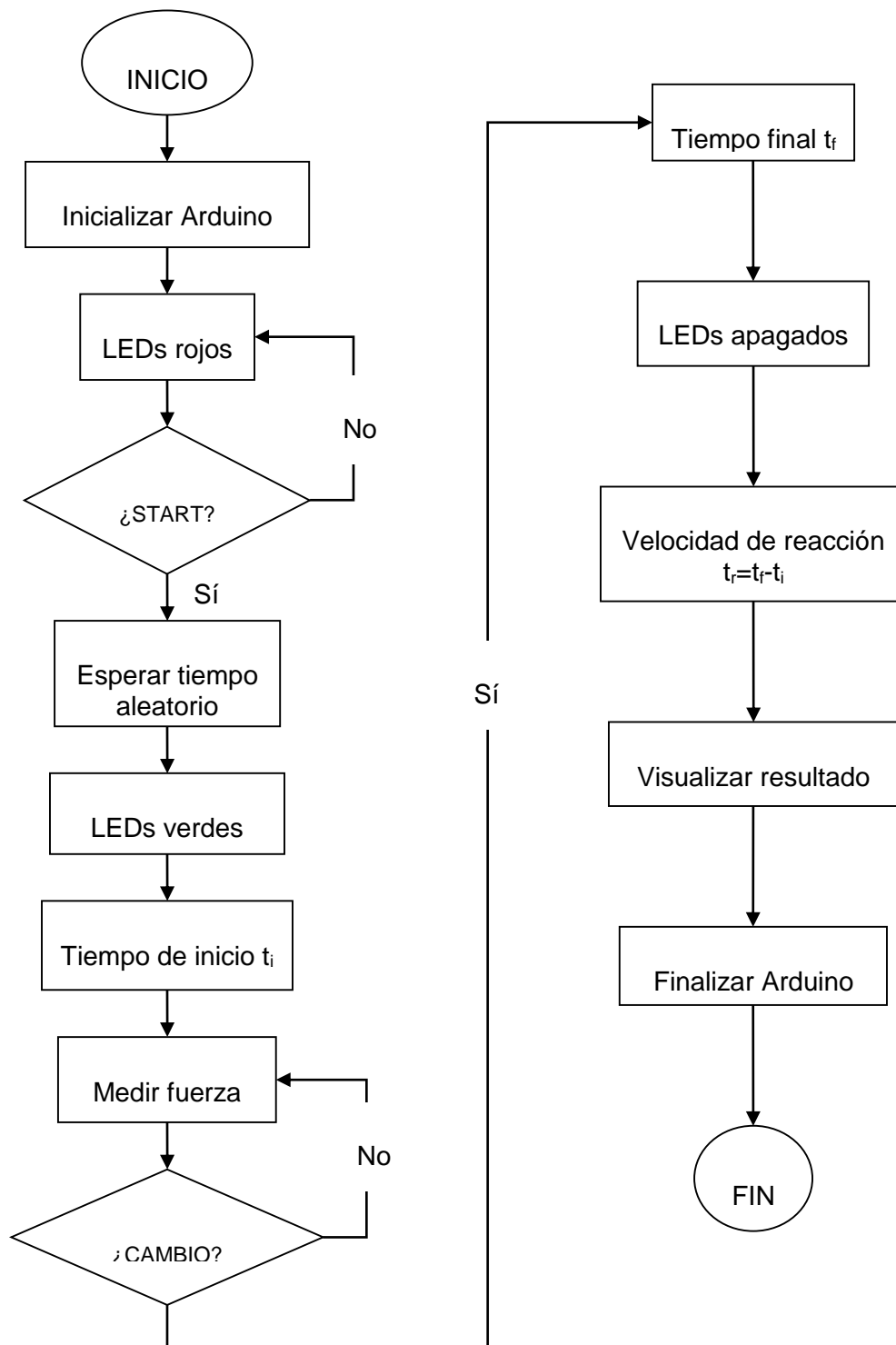
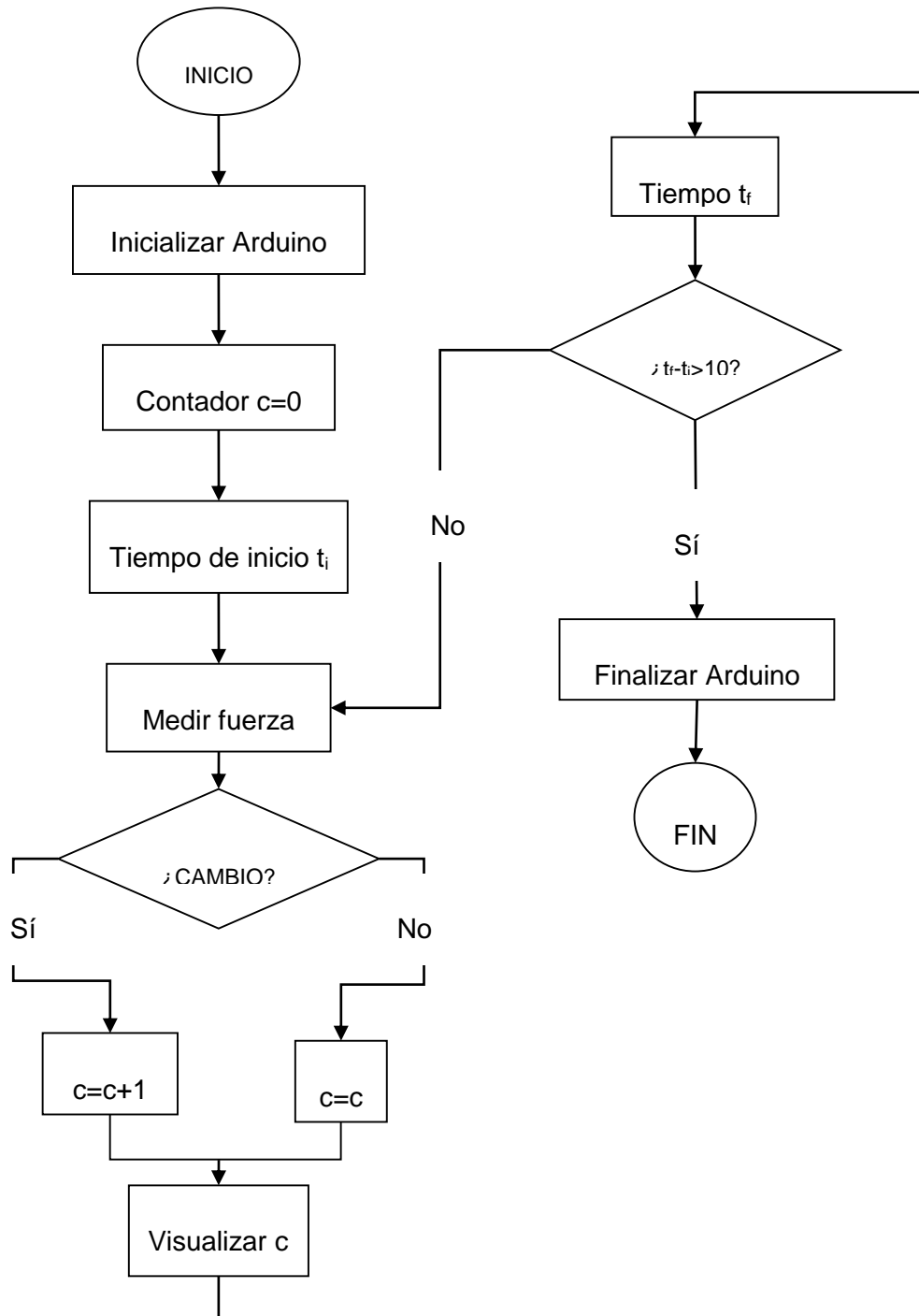


Figura 17. Diagrama de flujo para el programa que mide la velocidad de reacción.

○ **Conteo de golpes en 10 segundos**



**Figura 18. Diagrama de flujo del programa encargado del conteo de golpes en 10 segundos.**

La figura 18 presenta el diagrama de flujo que se empleó para el programa que se encarga de medir la cantidad de golpes en un intervalo de 10 segundos.

### **3.2.3 Diseño y construcción de la estructura física**

Se construyó una estructura que se encarga de contener los diferentes elementos del dispositivo, y tiene la capacidad suficiente para recibir los golpes del usuario. Los criterios que se tuvieron en cuenta para el diseño y construcción de la estructura son:

**Comodidad del usuario:** El dispositivo debe permitirle al usuario realizar los gestos necesarios de una manera natural.

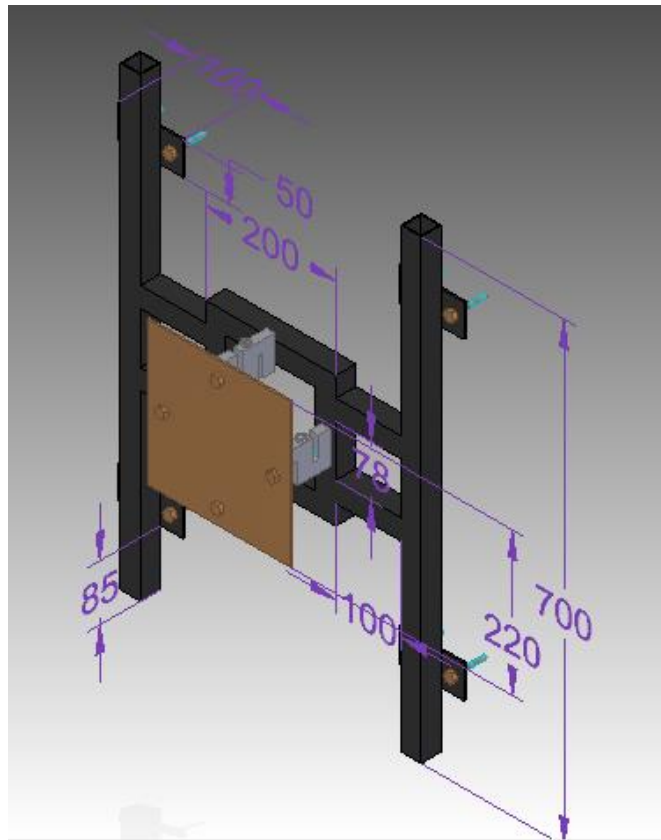
**Costos de materiales para construcción:** Se busca que los materiales de construcción sean relativamente económicos.

**Acoplamiento simple:** Las partes de hardware y software se deben ensamblar fácilmente.

- **Diseño CAD**

Cumpliendo con los criterios anteriormente mencionados, se continuó con el diseño en CAD de la estructura utilizando el programa Solid Edge.

La estructura (figura 19) consiste en una base de forma cuadrada con lados de 20cm. Mediante esta forma se consigue una distribución uniforme de la carga entre las cuatro celdas de carga, cada una ubicada en el punto medio de los lados. De forma paralela a la base se ubica una placa cuadrada de lados de 20cm de largo, la cual se une a la base utilizando como enlace a las celdas de carga. La placa es la encargada de recibir los golpes de forma directa. Perpendicular a la base y en direcciones opuestas, hay dos barras paralelas de 10cm a cada lado de perfil cuadrado de 3cm y espesor de 2mm. Paralelo a la base, unido por las dos barras, a cada lado, hay otra barra de 70cm de largo y el mismo perfil que las barras anteriores.

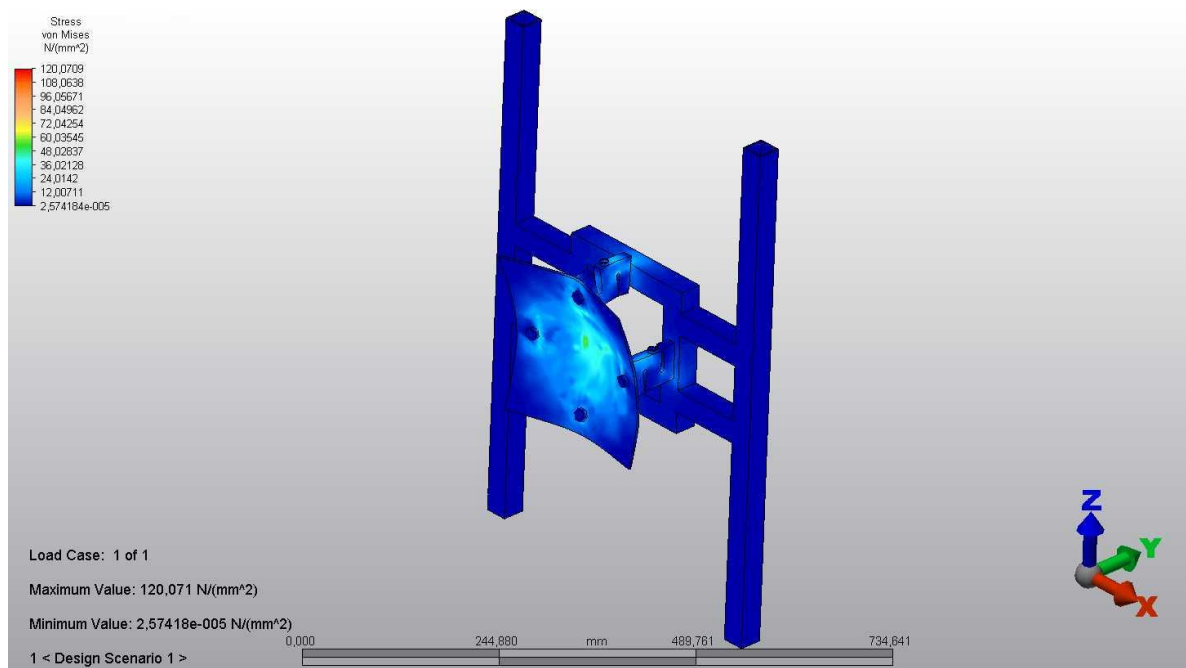


**Figura 19. Modelo CAD de la estructura.**

#### ○ **Análisis por elementos finitos (FEA)**

Usando el software Multiphysics, de Autodesk, se realizó un análisis por elementos finitos para identificar los puntos críticos donde se podían presentar fallas en la estructura según el criterio de von Mises en el que el stress no debe superar la tensión del material. Para la simulación, se eligió como material el acero ASTM A36 por disponibilidad de recursos. Para simular el golpe de un deportista se aplicó una fuerza de 4500N distribuida en un área redonda sobre el centro de la placa (figura 20). Se puede observar que, bajo estas condiciones, la estructura sufre un stress de aproximadamente 120MPa.





**Figura 20. Análisis por elementos finitos de la estructura con una carga de 4500N.**

### 3.2.4 Calibración de dispositivos

#### ○ Medición de fuerza

Para la calibración del dispositivo, se utilizó la máquina de ensayos universales Instron 3345. El procedimiento para este proceso consiste en aplicar fuerzas conocidas en el centro de la placa mientras se mide el voltaje generado por las celdas. El punto inicial de la prueba fue sin carga y a partir de ahí, se aumentó la carga a una tasa de 1N/s y cada 400N se pausaba durante 10 segundos para hacer las mediciones de voltaje hasta alcanzar 4000N. Este protocolo se realizó dos veces, tomando un total de 20 mediciones por celda. Los datos obtenidos se muestran en las tablas 5, 6 y en la tabla 7 los datos promedio de ambas pruebas.

**Tabla 5. Datos obtenidos para la prueba 1.**

Total	Cada celda	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
0	0	0,2842	0	0	0
400	100	0,6664	0,0735	0,9487	0,1813
800	200	1,1564	0,6713	1,4687	0,7546
1200	300	1,6758	1,2446	1,9887	1,372
1600	400	2,2099	1,8326	2,5087	1,9845
2000	500	2,7538	2,4353	3,0287	2,5676
2400	600	3,4153	3,1507	3,5487	3,0086

2800	700	3,9592	3,7779	4,0687	3,5672
3200	800	4,5031	4,3855	4,5887	4,1258
3600	900	5,0127	4,9931	5,1087	4,6746
4000	1000	5,5366	5,4889	5,6287	5,1982

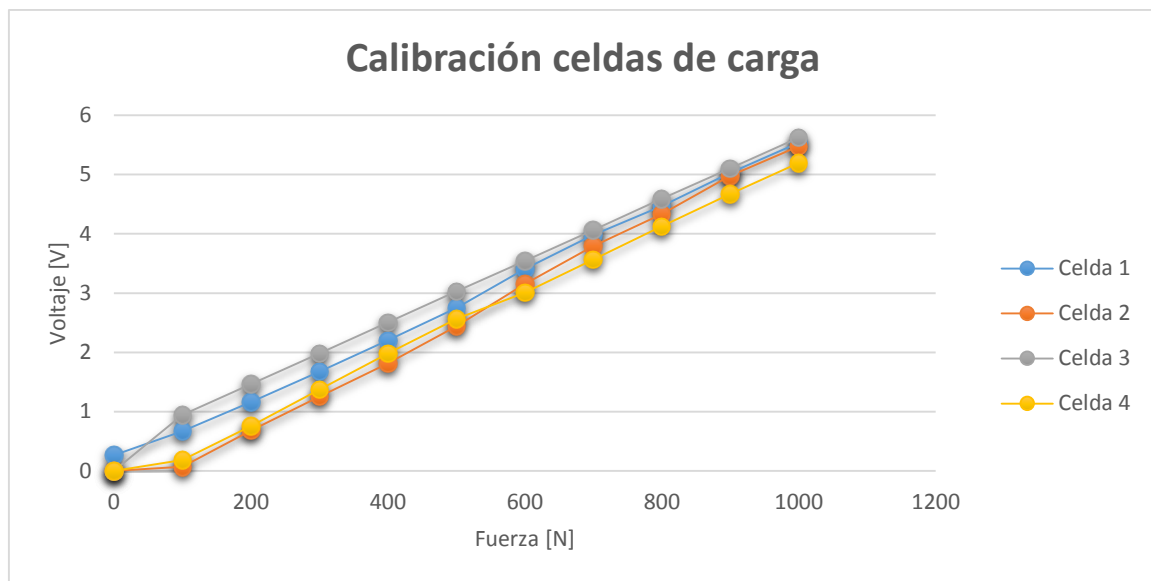
**Tabla 6. Datos obtenidos para la prueba 2.**

Total	Cada celda	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
0	0	0,2386	0	0	0
400	100	0,6754	0,0622	0,9374	0,1823
800	200	1,1613	0,6842	1,459	0,757
1200	300	1,6748	1,2567	1,9797	1,3679
1600	400	2,1987	1,7954	2,4985	1,9803
2000	500	2,7427	2,4513	3,0313	2,5624
2400	600	3,4001	3,1623	3,5412	3,0112
2800	700	4,0028	3,8094	4,0593	3,5589
3200	800	4,4258	4,2738	4,5906	4,1298
3600	900	5,0469	4,9715	5,0993	4,6691
4000	1000	5,5366	5,4651	5,6198	5,1938

**Tabla 7. Datos promedio de las pruebas 1 y 2.**

Total	Cada celda	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
0	0	0,2614	0	0	0
400	100	0,6709	0,06785	0,94305	0,1818
800	200	1,15885	0,67775	1,46385	0,7558
1200	300	1,6753	1,25065	1,9842	1,36995
1600	400	2,2043	1,814	2,5036	1,9824
2000	500	2,74825	2,4433	3,03	2,565
2400	600	3,4077	3,1565	3,54495	3,0099
2800	700	3,981	3,79365	4,064	3,56305
3200	800	4,46445	4,32965	4,58965	4,1278
3600	900	5,0298	4,9823	5,104	4,67185
4000	1000	5,5366	5,477	5,62425	5,196

La figura 21 muestra la gráfica generada con los datos que se muestran en la tabla 7.



**Figura 21. Gráfica de calibración de las celdas de carga.**

La tabla 8 muestra las ecuaciones obtenidas por el método de regresión lineal y su respectivo coeficiente de correlación de Pearson para los datos de cada celda.

**Tabla 8. Regresión lineal y coeficiente de Pearson.**

Celda	Ecuación	Coeficiente de Pearson ( $R^2$ )
Celda 1	$V = 0.0054F + 0.1243$	0.9985
Celda 2	$V = 0.0059F + 0.3837$	0.9937
Celda 3	$V = 0.0054F + 0.2881$	0.9962
Celda 4	$V = 0.0054F + 0.2101$	0.9973

Utilizando las ecuaciones de la tabla anterior se despejó el valor de fuerza y las ecuaciones resultantes se utilizaron en el código del programa para calcular la fuerza a partir del voltaje (tabla 9).

**Tabla 9. Ecuaciones de fuerza para cada celda.**

<b>Celda</b>	<b>Ecuación</b>
Celda 1	$F = \frac{V - 0.1243}{0.0054}$
Celda 2	$F = \frac{V - 0.3837}{0.0059}$
Celda 3	$F = \frac{V - 0.2881}{0.0054}$
Celda 4	$F = \frac{V - 0.2101}{0.0054}$

○ **Medición de aceleración**

Para el circuito de medición de aceleración se tomaron los valores de calibración determinados por el fabricante (tabla 10).

**Tabla 10. Sensibilidad del acelerómetro con alimentación de 3.3V (Datos del fabricante).**

Eje X	14.215mV/g
Eje Y	10.935mV/g
Eje Z	11.809mV/g

### **3.3 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL DISPOSITIVO CONSTRUIDO**

Para comprobar el funcionamiento del dispositivo se realizó un protocolo de evaluación (ver Anexo 1) con cinco sujetos. La población de prueba son hombres y mujeres con edades entre los 18 y los 30 años. Cada prueba se realizó dos veces por persona.

Antes de la evaluación, a cada sujeto se le explicó en qué consistían las pruebas y firmaron un consentimiento informado aceptando los términos y condiciones de su participación (Anexo 2).

## **4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

En esta sección se presentarán los resultados obtenidos con su respectivo análisis.

### **4.1 SELECCIÓN DE TRANSDUCTORES Y DISPOSITIVOS**

Utilizando el método de diseño de concepto se seleccionaron los siguientes elementos ya que por medio de la evaluación de las posibles soluciones, obtuvieron las calificaciones más altas. Luego de la selección de los elementos, se continuó con la búsqueda específica de las referencias de los elementos que cumplieran con las especificaciones establecidas.

- Medición de fuerza: Celda de carga.

Cuatro celdas de carga tipo S con referencia S250LB de la compañía VECTOR con capacidad de medida 250lb cada una.

- Medición de aceleración: Acelerómetro de tres ejes.

Acelerómetro 832M1-0100 de Measurement Specialties con capacidad de medida de  $\pm 100$  unidades de gravedad.

- Estímulo visual: Matriz de LEDs.

Matriz de LEDs de 8 filas y 5 columnas de color rojo y verde.

- Método de transmisión: Módulos XBee.

Módulos XBee serie 1 (S1) de Digi International con rango de transmisión de 30m en interiores y 90m en exteriores.

- Procesamiento de datos: Arduino.

Placa Arduino Mega.

- Software e interfaz gráfica: LabVIEW.

LabVIEW 2013 de National Instruments.

- Mostrar resultados: Computador.

### **4.2 CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN**

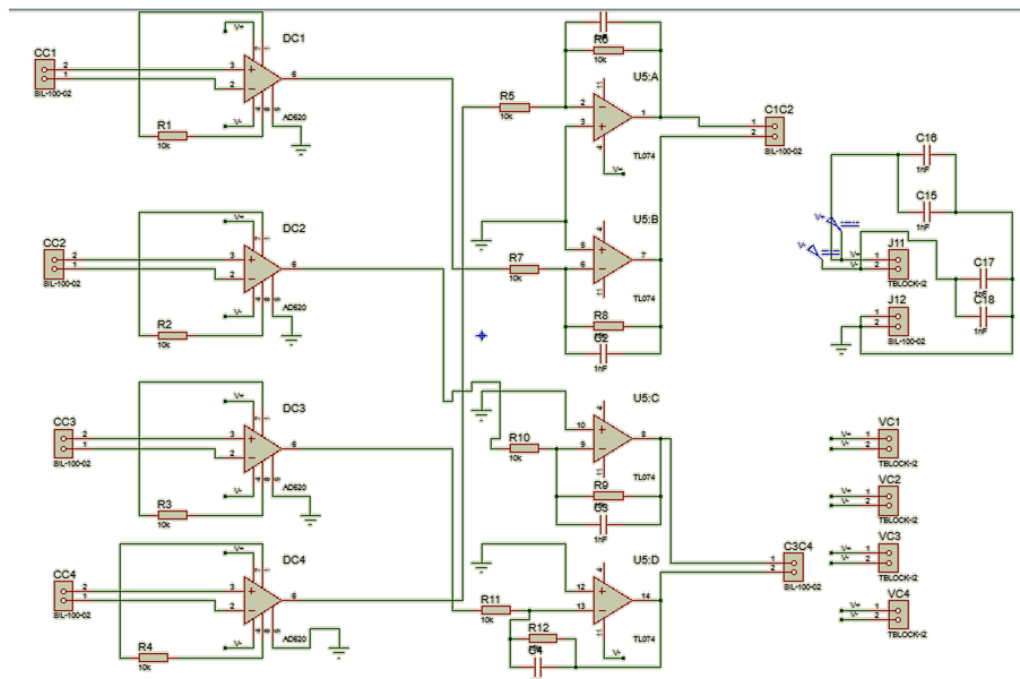
#### **4.2.1 Circuitos eléctricos**

A continuación se presentan los circuitos construidos para realizar las mediciones de fuerza y velocidad.

## ○ Circuito de medición de fuerza

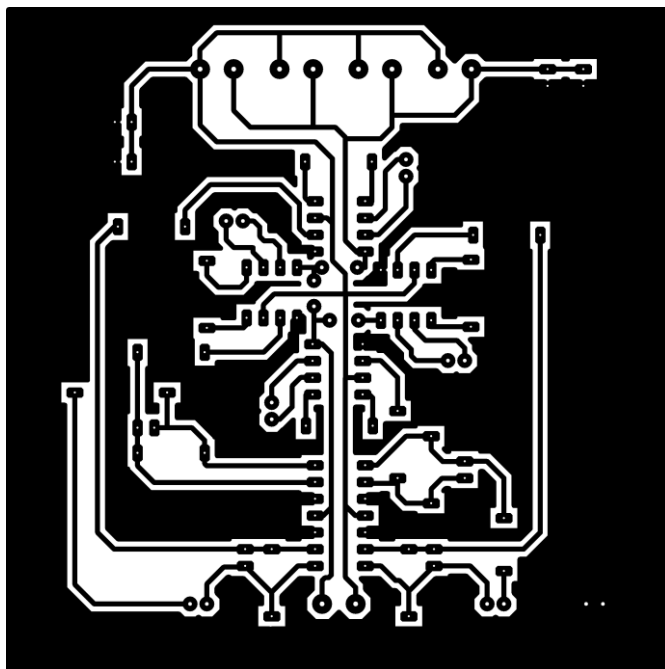
El circuito para medir la fuerza es el encargado de la recepción y acondicionamiento de las señales generadas por las celdas de carga. Para cumplir con su función, este circuito cuenta con cuatro amplificadores de instrumentación AD620 para diferenciar la señal y cuatro amplificadores operacionales configurados como filtros pasa bajas para eliminar frecuencias que pueden interferir con las señales de interés.

El diseño del circuito fue implementado en una sola placa y se integra como se muestra en la figura 22 en la cual se observa el esquemático de las conexiones entre los elementos utilizados para lograr medir la fuerza. El esquema del circuito se realizó usando el software ISIS Proteus.



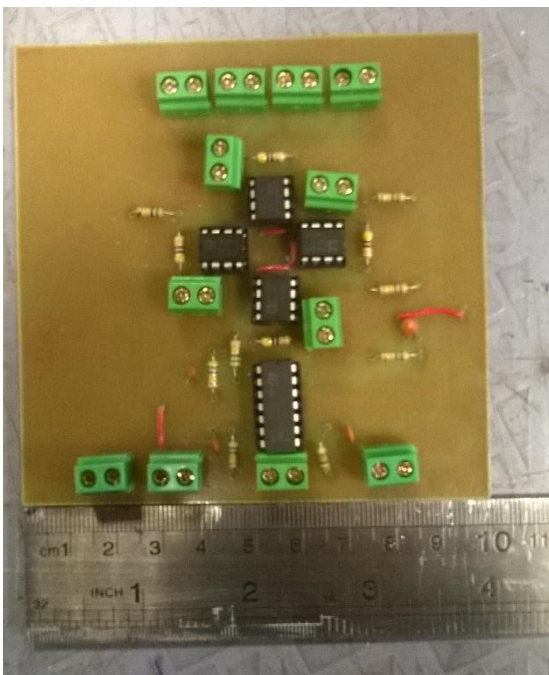
**Figura 22. Esquemático del circuito de medición de fuerza.**

Posteriormente, se realizó el diseño del PCB en el software ARES Proteus. La placa fue diseñada a una sola capa y se muestra en la figura 23.



**Figura 23. Diseño PCB de circuito de medición de fuerza.**

Finalmente se construyó la tarjeta del circuito en una base de fibra de vidrio. El circuito final de la etapa de medición de fuerza se observa en la figura 24.

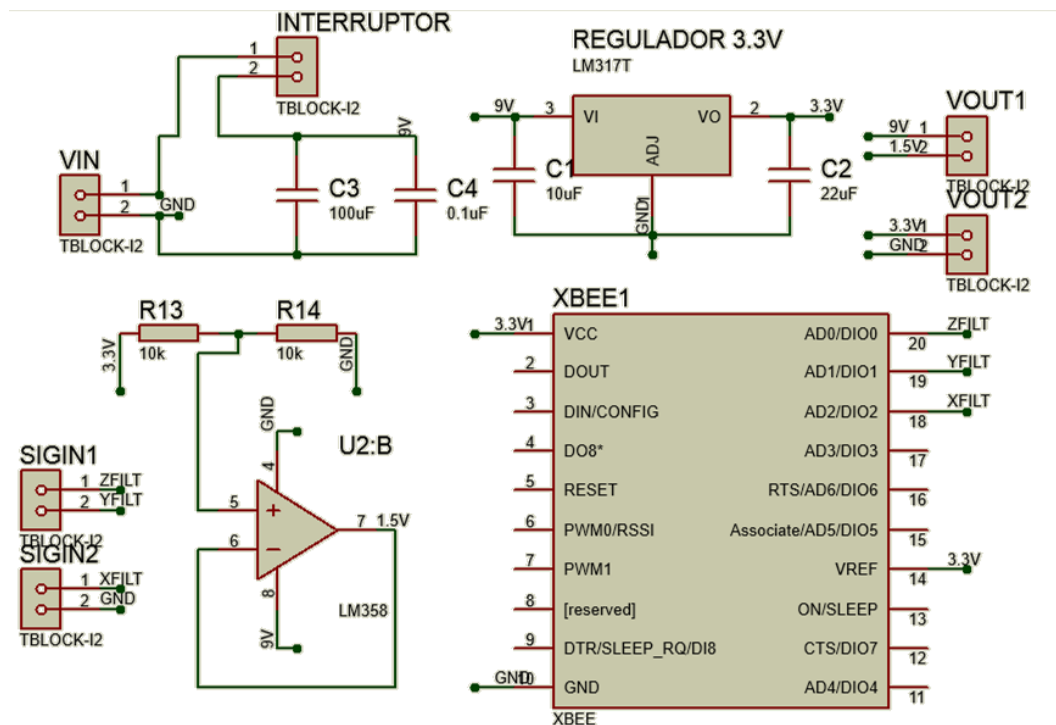


**Figura 24. Circuito de medición de fuerza.**

○ **Circuito de medición de aceleración**

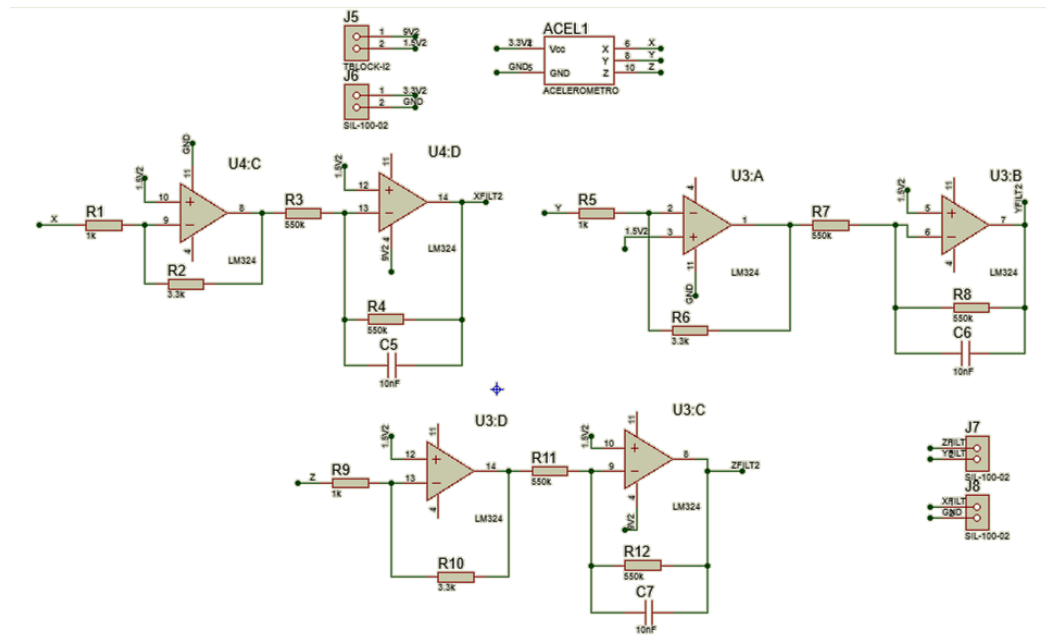
El circuito de medición de aceleración es el encargado de medir los datos entregados por el acelerómetro, acondicionarlos y transmitirlos de manera inalámbrica al módulo receptor que se encuentra conectado al computador con los programas de visualización por un puerto USB.

Para el diseño del circuito de la medición de la aceleración se realizó una etapa de regulación de los voltajes de alimentación ya que algunos elementos necesitaban una alimentación de 3.3V y otros necesitaban una referencia 1.5V. Por este motivo, se organizó el circuito en dos etapas, una de regulación de voltajes y transmisión de datos y otra de medición y acondicionamiento de datos. Las figuras 25 y 26 muestran los esquemáticos de las dos etapas de este circuito.



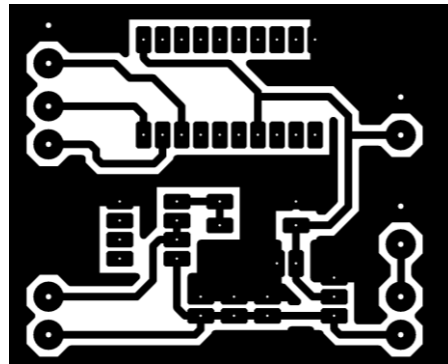
**Figura 25. Esquemático de regulación de voltaje y transmisión de datos del circuito de medición de aceleración.**



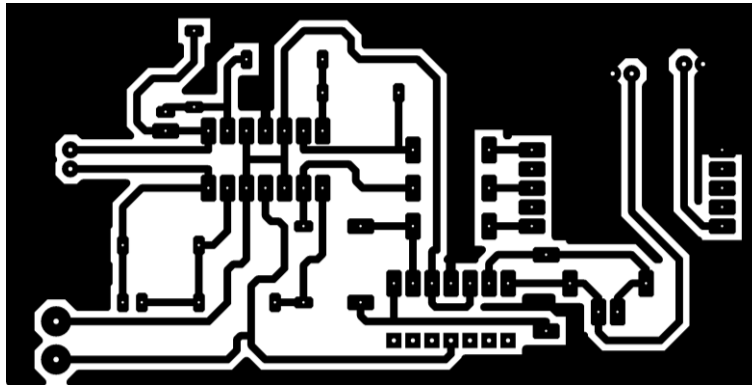


**Figura 26. Esquemático de medición y acondicionamiento de datos del circuito de medición de aceleración.**

Los diseños del PCB de ambas etapas del circuito se muestran en las figuras 27 y 28.

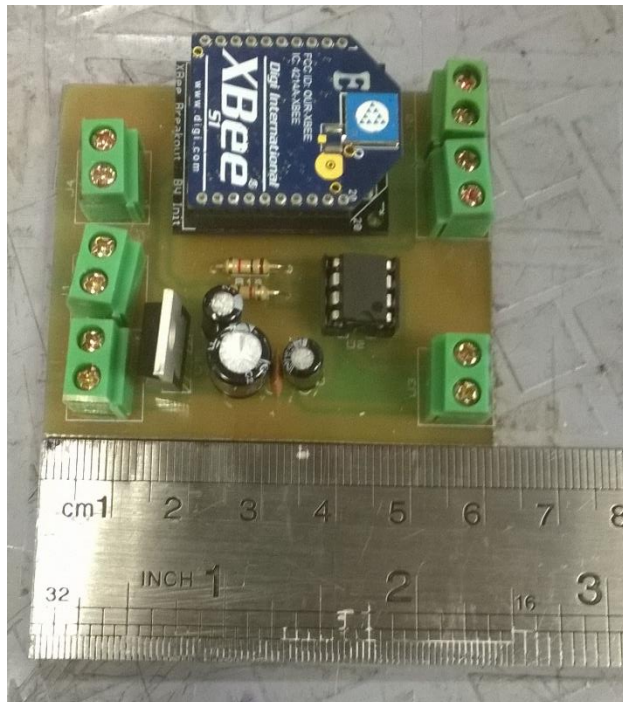


**Figura 27. Diseño PCB de regulación de voltaje y transmisión de datos del circuito de medición de aceleración.**

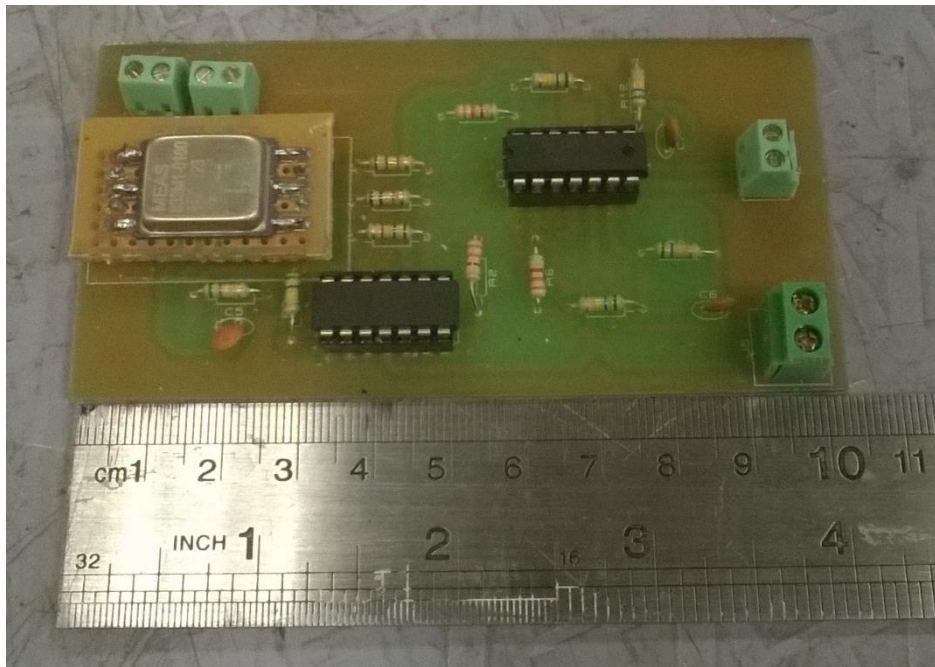


**Figura 28. Diseño PCB de medición y acondicionamiento de datos del circuito de medición de aceleración.**

En las figuras 29 y 30 se muestran los circuitos definitivos para ambas etapas de la medición de la aceleración.



**Figura 29. Circuito de regulación de voltaje y transmisión de datos del circuito de medición de aceleración.**



**Figura 30. Circuito de medición y acondicionamiento de datos del circuito de medición de aceleración.**

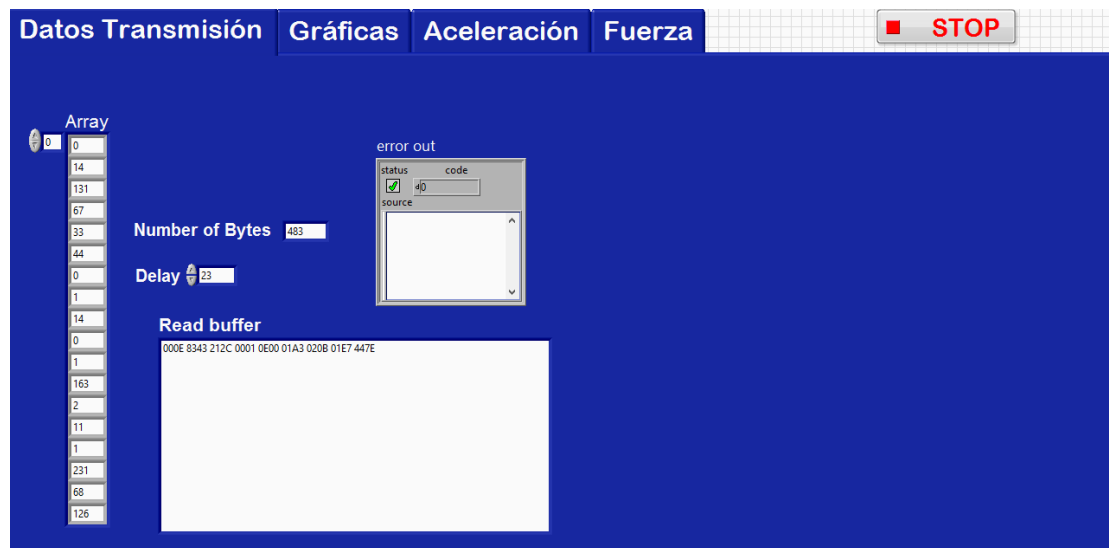
#### **4.2.2 Software**

Como se explicó en el numeral 3.2.2 el software del dispositivo se compone de tres programas. El primero mide la fuerza y velocidad de un golpe, el segundo la velocidad de reacción ante un estímulo visual, y el tercero el número de golpes ejecutados en un período de 10 segundos.

A continuación se muestran las diferentes interfaces gráficas de usuario desarrolladas.

##### ○ **Medición de fuerza y aceleración**

La interfaz de este programa está dividida en cuatro pestañas con funciones diferentes. La primera, llamada Datos Transmisión (figura 31) se utiliza para verificar la correcta conexión del módulo de transmisión inalámbrico y modificar la velocidad de transmisión de datos.



**Figura 31. Pestaña “Datos Transmisión” del programa de medición de fuerza y aceleración.**

La pestaña “Gráficas” (figura 32) muestra los datos de aceleración en cada uno de los ejes ortogonales de movimiento y la suma vectorial de ellos que indica la aceleración total.



**Figura 32. Pestaña “Gráficas” del programa de medición de fuerza y aceleración.**

En la figura 33 se observa la pestaña “Velocidad” que es la encargada de mostrar la velocidad en los tres ejes en una sola gráfica.



**Figura 33. Pestaña “Velocidad” del programa de medición de fuerza y aceleración.**

Finalmente, en la pestaña “Fuerza” (figura 34) se observa una gráfica que muestra la evolución de la fuerza en el tiempo y al momento de ejecutar el golpe muestra el valor máximo de fuerza registrado.



**Figura 34. Pestaña “Fuerza” del programa de medición de fuerza y aceleración.**

#### ○ Velocidad de reacción

El programa para medir la velocidad de reacción (figura 35) tiene la opción de elegir la cantidad de pruebas que el usuario desee realizar. Para esto se utiliza un control numérico que permite seleccionar mínimo una prueba y se bloquea al iniciar las pruebas para evitar errores en la ejecución del programa. Tiene un contador para indicar cuantas pruebas se

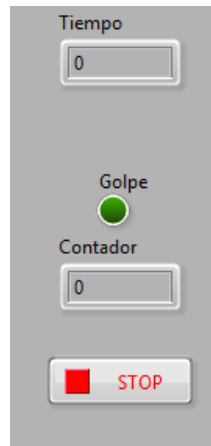
han realizado y muestra la velocidad de reacción independiente para cada prueba. Al finalizar las pruebas, una ventana muestra la velocidad de reacción promedio de las pruebas realizadas.



**Figura 35. Interfaz gráfica para el programa de medición de velocidad de reacción.**

#### ○ **Conteo de golpes en 10 segundos**

La interfaz gráfica para el conteo de golpes en 10 segundos (figura 36) tiene un contador de golpes, un indicador del tiempo que se ha ejecutado la prueba y un botón para interrumpir la prueba cuando el usuario lo desee.



**Figura 36. Interfaz gráfica para el programa de conteo de golpes en 10 segundos.**

### 4.2.3 Estructura física

Como resultado final se construyó una estructura física como la que se describe en la sección 3.2.3 (figura 37), cumpliendo con los materiales y dimensiones propuestas. Para la protección física del usuario se añadió una espuma comercial la cual no afecta la medida de la fuerza.



**Figura 37. Estructura física del dispositivo.**

## 4.3 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DEL DISPOSITIVO

A continuación se muestran las gráficas de los resultados obtenidos a partir del protocolo de evaluación (Anexo 1).

### 4.3.1 Prueba 1: Fuerza y aceleración

Teniendo en cuenta los conceptos de varios autores como Ortiz (1996) y Morente Montero (2013) se decidió medir la aceleración y no la velocidad del golpe ya que la aceleración es una aptitud más influyente en el desarrollo de fuerza explosiva o potencia.

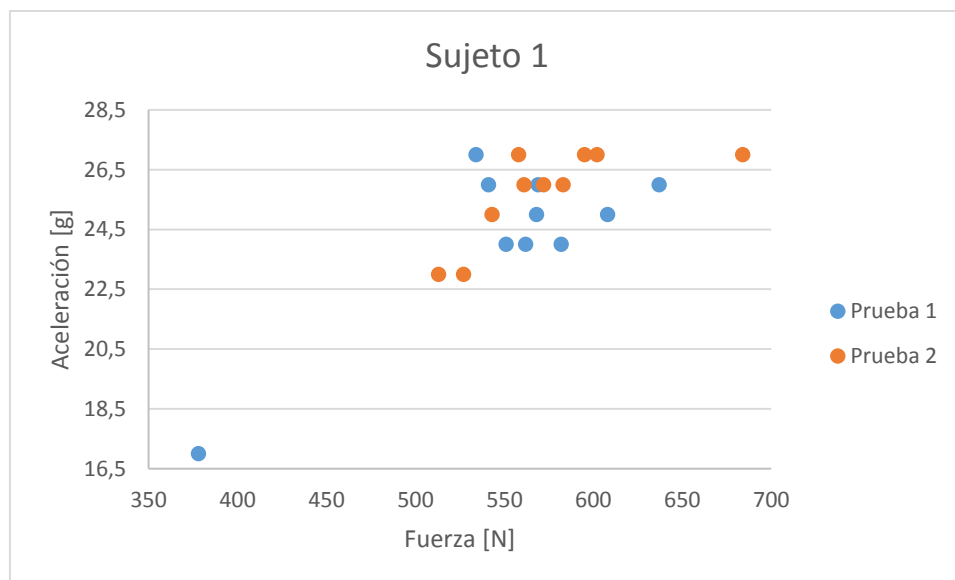
En esta prueba el sujeto debía ejecutar un total de 10 golpes con máxima fuerza y aceleración, en un tiempo límite de 50 segundos.

A continuación se muestran los resultados de las mediciones del dispositivo en la prueba de fuerza y aceleración máxima para cada uno de los sujetos. Para esta prueba se realizaron tres gráficas: fuerza medida por golpe, aceleración medida por golpe y relación fuerza- aceleración.

**Tabla 11. Datos de fuerza y aceleración del sujeto 1.**

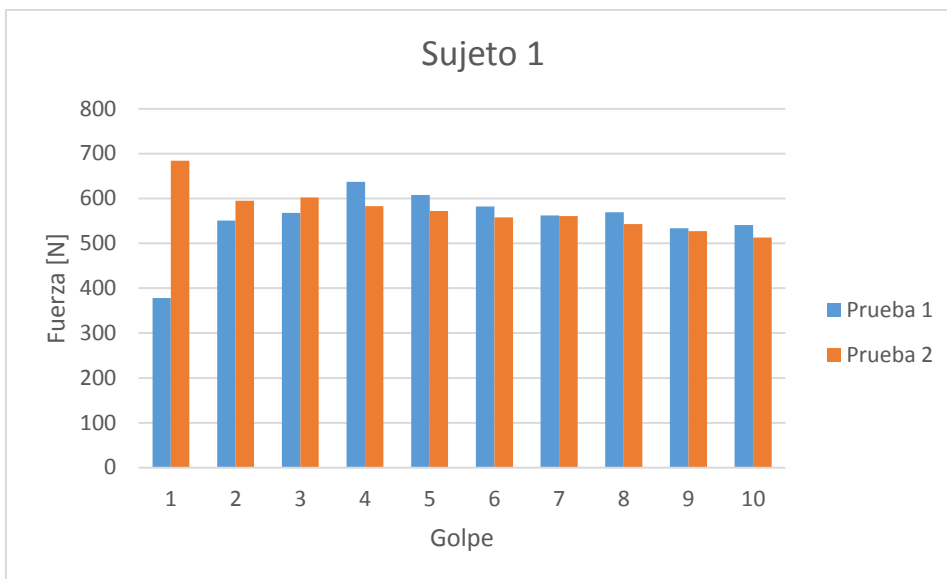
Fuerza Y Aceleración Máxima Sujeto 1					
Prueba 1			Prueba 2		
No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)	No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)
1	378	17	1	684	27
2	551	24	2	595	27
3	568	25	3	602	27
4	637	26	4	583	26
5	608	25	5	572	26
6	582	24	6	558	27
7	562	24	7	561	26
8	569	26	8	543	25
9	534	27	9	527	23
10	541	26	10	513	23

Las figuras 38, 39 y 40 muestran los resultados para el sujeto 1.

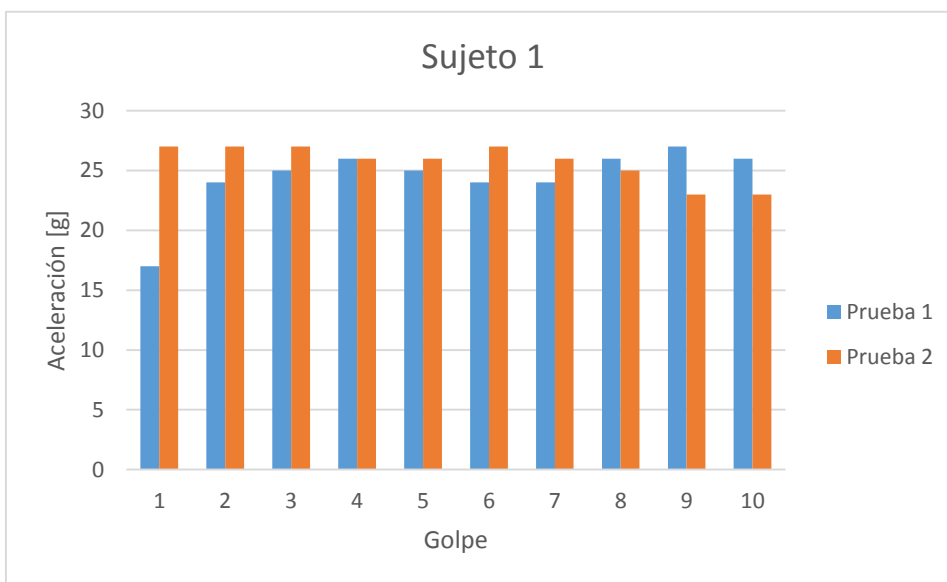


**Figura 38. Relación fuerza- aceleración para el sujeto 1.**





**Figura 39. Fuerza en cada golpe para el sujeto 1.**

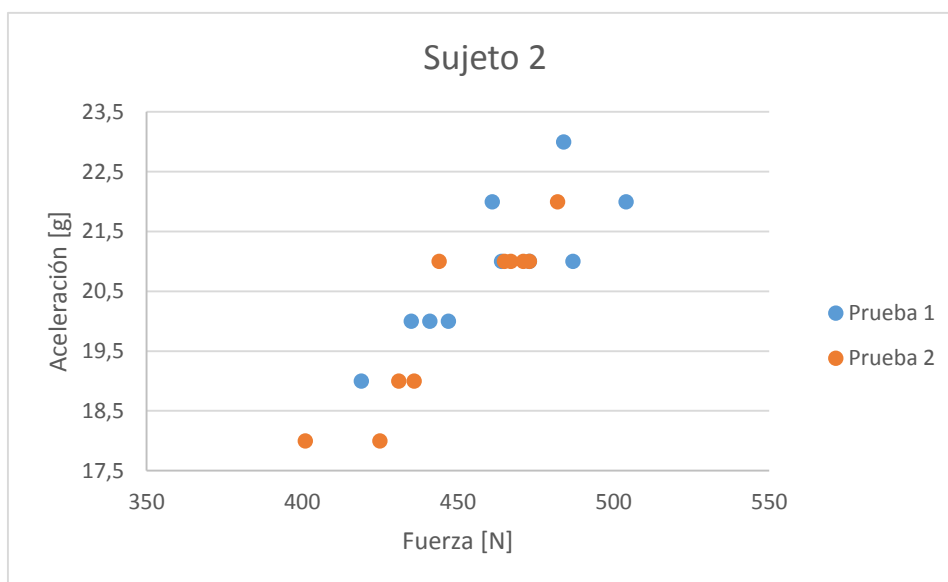


**Figura 40. Aceleración en cada golpe para el sujeto 1.**

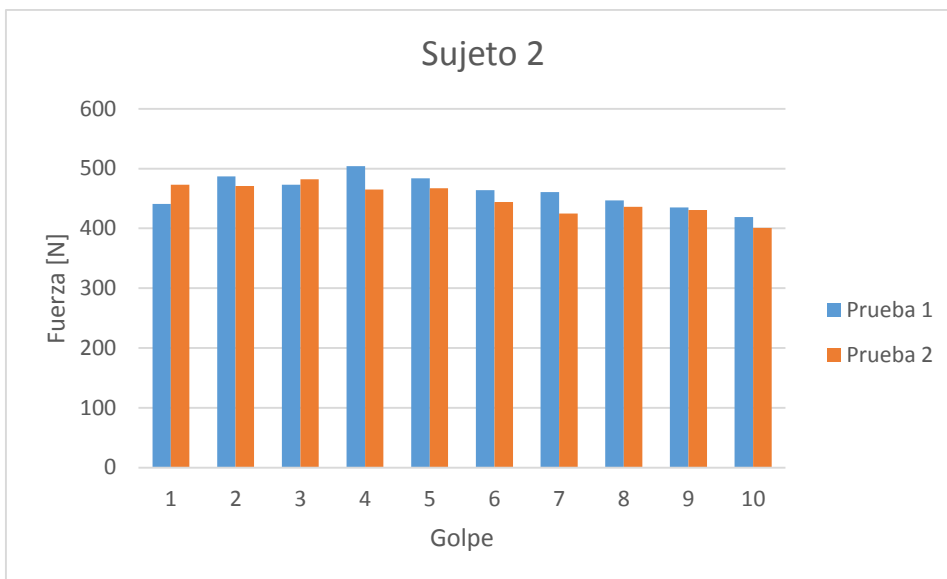
**Tabla 12. Datos de fuerza y aceleración del sujeto 2.**

Fuerza Y Aceleración Máxima Sujeto 2					
Prueba 1			Prueba 2		
No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)	No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)
1	441	20	1	473	21
2	487	21	2	471	21
3	473	21	3	482	22
4	504	22	4	465	21
5	484	23	5	467	21
6	464	21	6	444	21
7	461	22	7	425	18
8	447	20	8	436	19
9	435	20	9	431	19
10	419	19	10	401	18

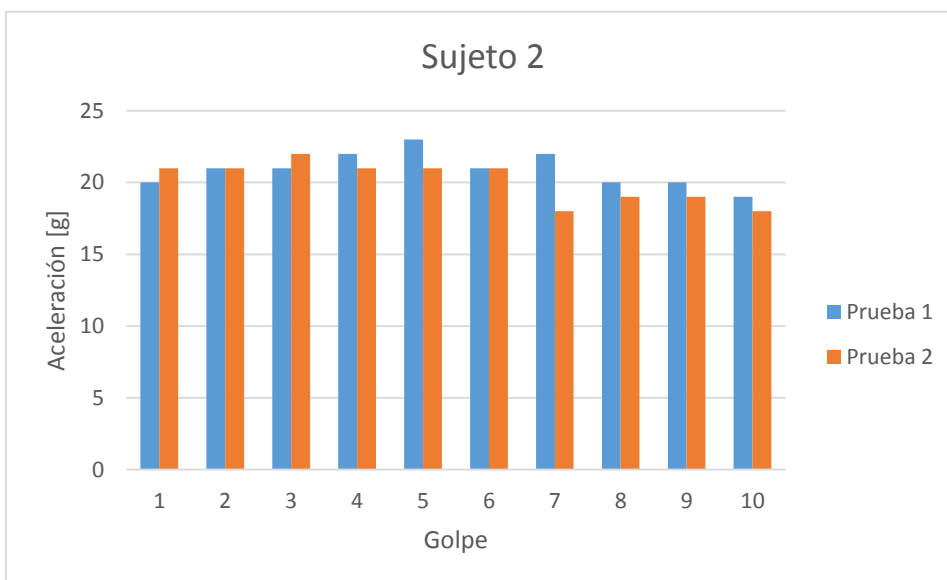
Las figuras 41, 42 y 43 muestran los resultados para el sujeto 2.



**Figura 41. Relación fuerza- aceleración para el sujeto 2.**



**Figura 42. Fuerza en cada golpe para el sujeto 2.**

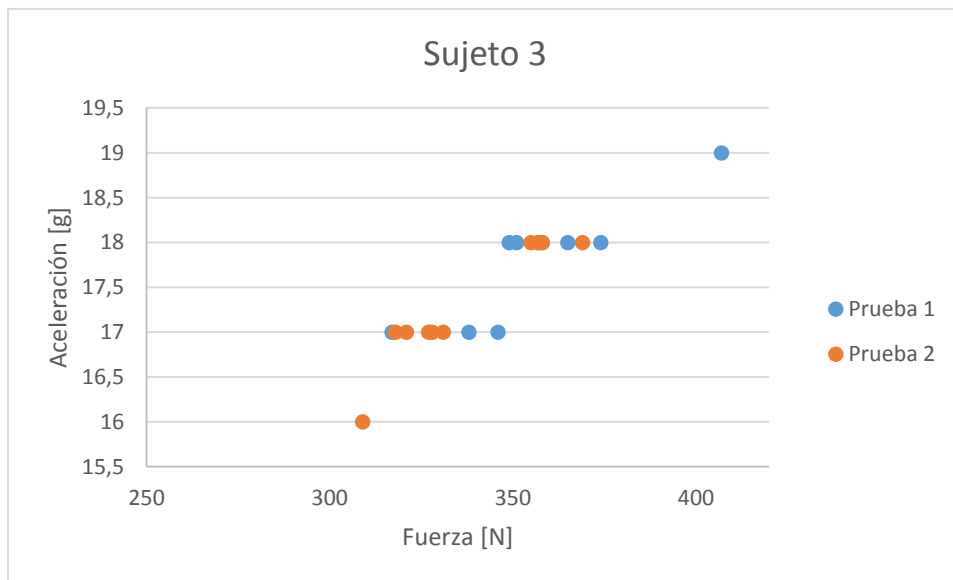


**Figura 43. Aceleración en cada golpe para el sujeto 2.**

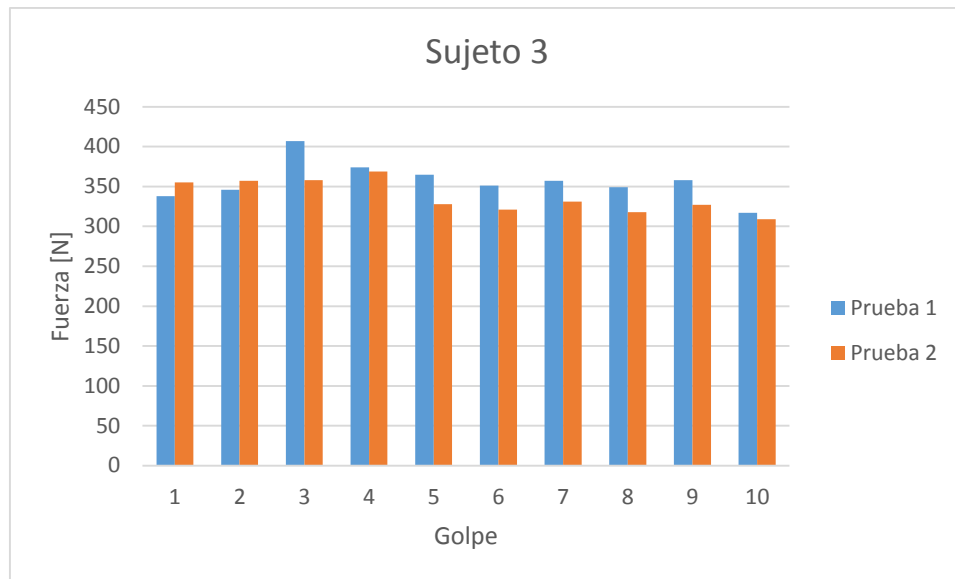
**Tabla 13. Datos de fuerza y aceleración del sujeto 3.**

<b>Fuerza Y Aceleración Máxima Sujeto 3</b>					
Prueba 1			Prueba 2		
No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)	No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)
1	338	17	1	355	18
2	346	17	2	357	18
3	407	19	3	358	18
4	374	18	4	369	18
5	365	18	5	328	17
6	351	18	6	321	17
7	357	18	7	331	17
8	349	18	8	318	17
9	358	18	9	327	17
10	317	17	10	309	16

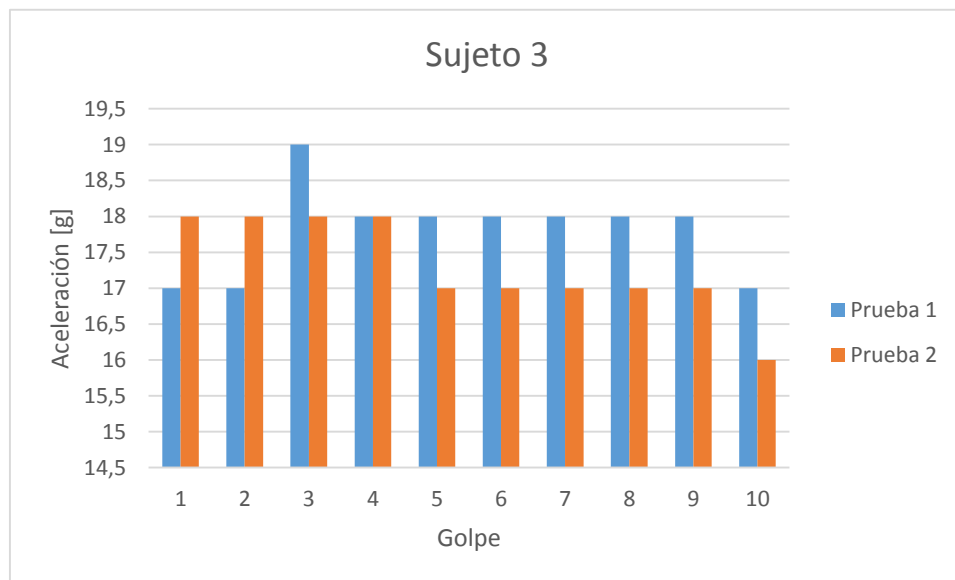
Las figuras 44, 45 y 46 muestran los resultados para el sujeto 3.



**Figura 44. Relación fuerza- aceleración para el sujeto 3.**



**Figura 45. Fuerza en cada golpe para el sujeto 3.**

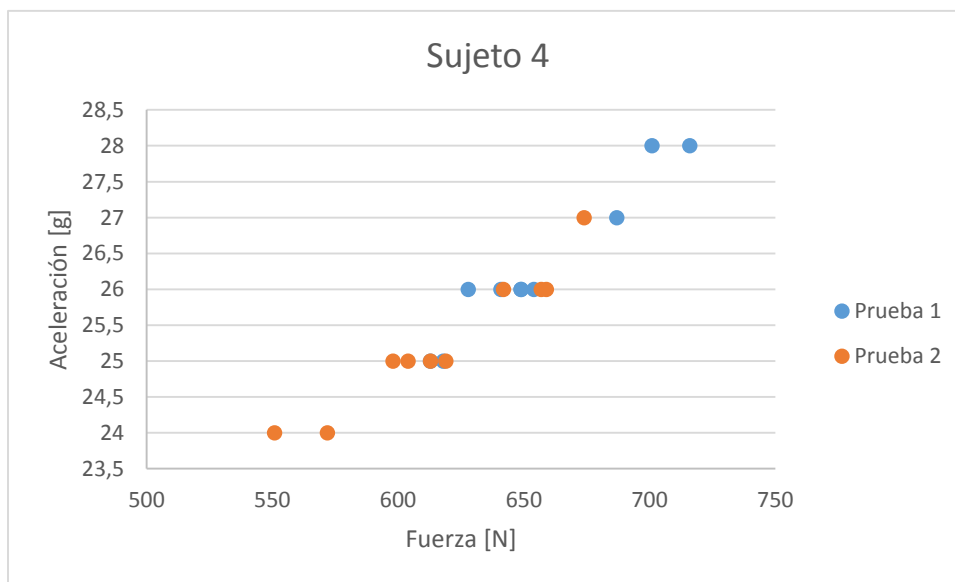


**Figura 46. Aceleración en cada golpe para el sujeto 3.**

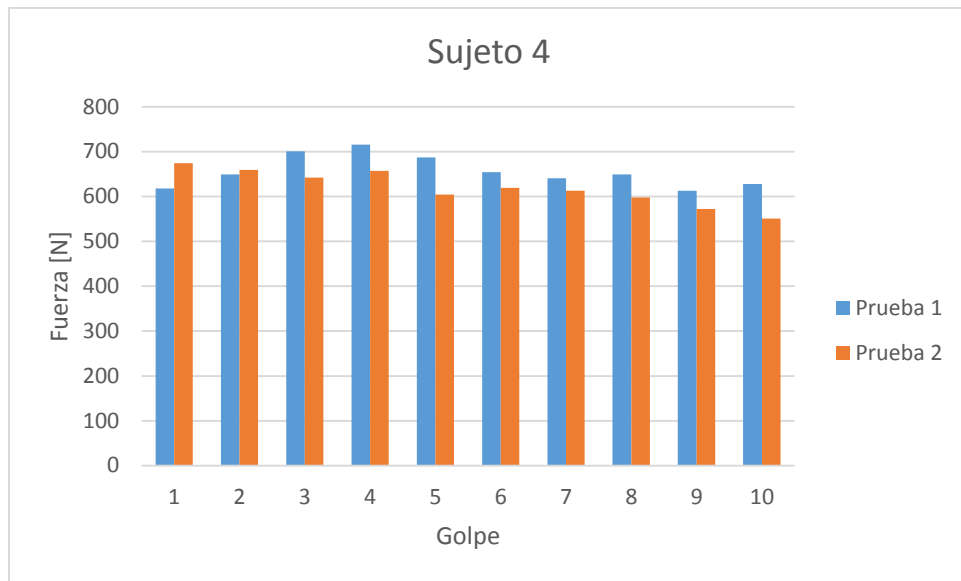
**Tabla 14. Datos de fuerza y aceleración del sujeto 4.**

Fuerza Y Aceleración Máxima Sujeto 4					
Prueba 1			Prueba 2		
No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)	No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)
1	618	25	1	674	27
2	649	26	2	659	26
3	701	28	3	642	26
4	716	28	4	657	26
5	687	27	5	604	25
6	654	26	6	619	25
7	641	26	7	613	25
8	649	26	8	598	25
9	613	25	9	572	24
10	628	26	10	551	24

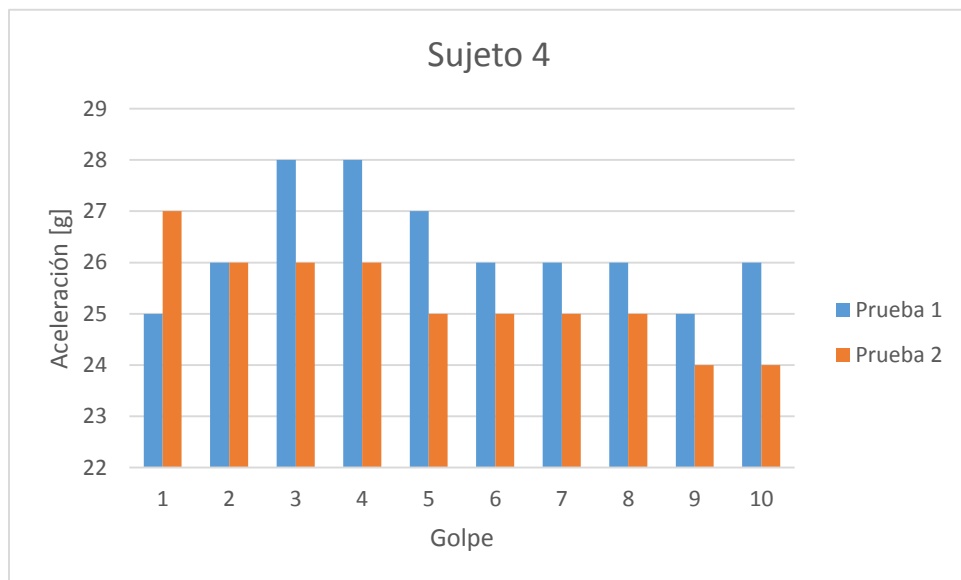
Las figuras 47, 48 y 49 muestran los resultados para el sujeto 4.



**Figura 47. Relación fuerza- aceleración para el sujeto 4.**



**Figura 48. Fuerza en cada golpe para el sujeto 4.**

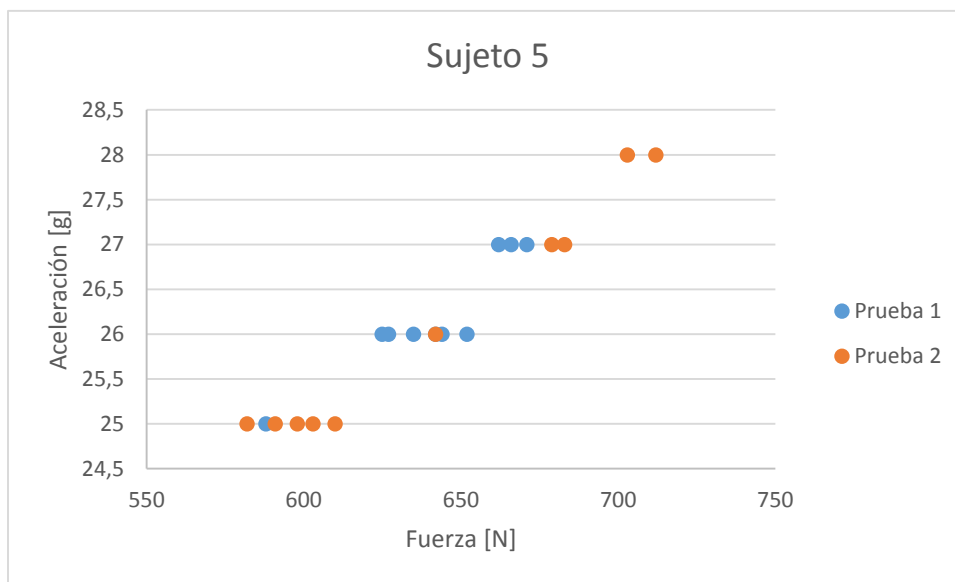


**Figura 49. Aceleración en cada golpe para el sujeto 4.**

**Tabla 15. Datos de fuerza y aceleración del sujeto 5.**

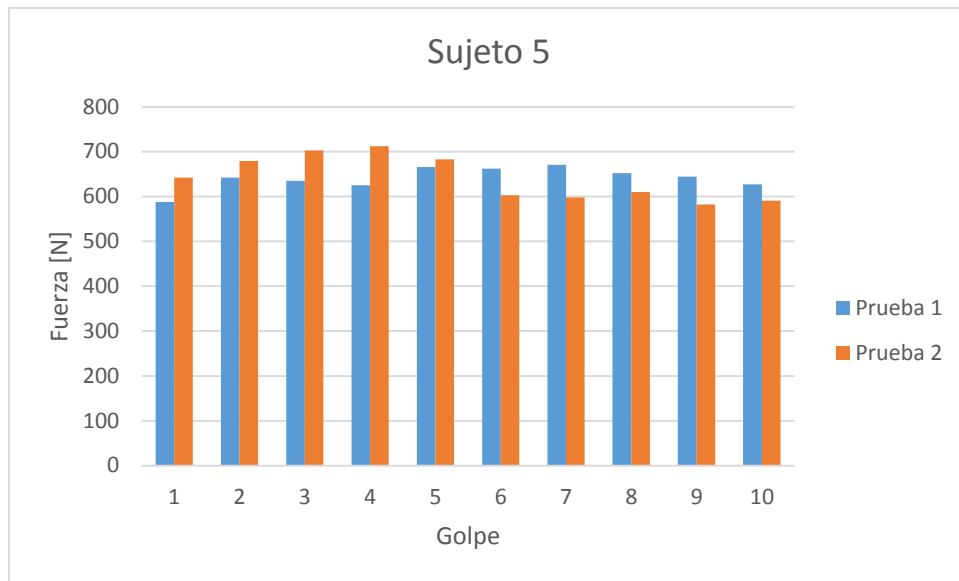
Fuerza Y Aceleración Máxima Sujeto 5					
Prueba 1			Prueba 2		
No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)	No. Golpe	Fuerza (N)	Aceleración (g)
1	588	25	1	642	26
2	642	26	2	679	27
3	635	26	3	703	28
4	625	26	4	712	28
5	666	27	5	683	27
6	662	27	6	603	25
7	671	27	7	598	25
8	652	26	8	610	25
9	644	26	9	582	25
10	627	26	10	591	25

Las figuras 50, 51 y 52 muestran los resultados para el sujeto 5.

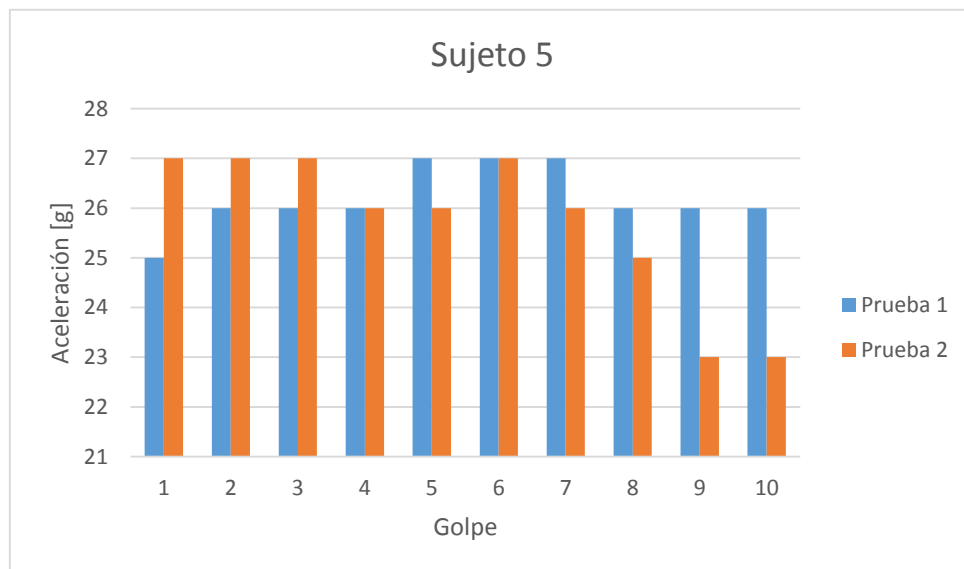


**Figura 50. Relación fuerza- aceleración para el sujeto 5.**





**Figura 51. Fuerza en cada golpe para el sujeto 5.**



**Figura 52. Aceleración en cada golpe para el sujeto 5.**

Por medio de las gráficas se puede apreciar que los valores de fuerza tienden a ser bajos al inicio y al final de la prueba. Esto puede deberse a que inicialmente los sujetos no ejecutaban los golpes con total confianza o tenían temor a una lesión puesto que no habían utilizado el dispositivo anteriormente. Los valores bajos al final de la prueba pueden ser por cansancio debido a que los sujetos no contaban con el entrenamiento necesario para mantener el adecuado nivel de resistencia.

Observando las gráficas que relacionan fuerza y aceleración, se puede apreciar que los golpes que se ejecutan con mayor aceleración suelen tener mayor fuerza de impacto.

Se encuentra una diferencia entre los resultados obtenidos y los presentados por Chadli et al (2014), pues en este estudio obtuvieron mayores resultados para fuerza y aceleración. Esta diferencia se puede fundamentar en que los sujetos de prueba de este estudio, no eran deportistas de combate.

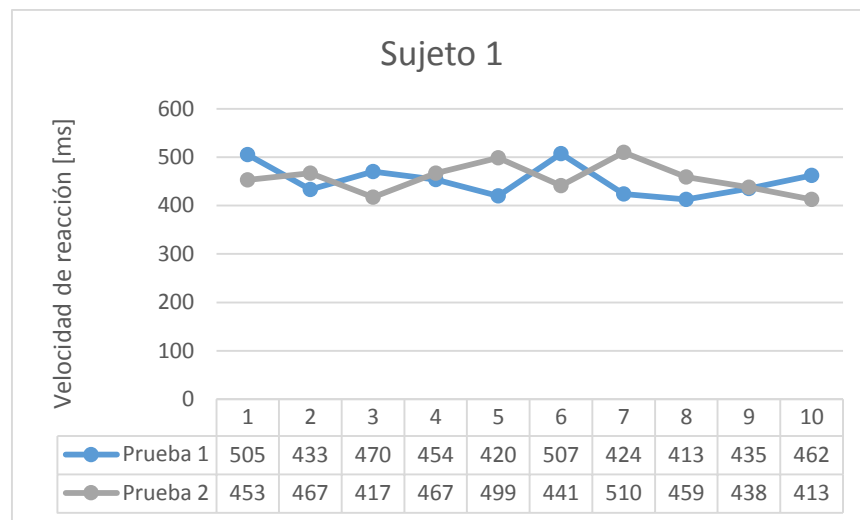
#### 4.3.2 Prueba 2: Velocidad de reacción

En esta prueba el sujeto debía ejecutar un golpe al recibir una señal visual. Dicha señal será el cambio de color (Rojo a verde) de una matriz de LED's ubicada en la parte superior derecha de la base. Para completar la prueba se emitieron 10 estímulos, cada uno variaba en un periodo entre 4 y 7 segundos. El sujeto de prueba debía mantener la misma distancia y postura para cada golpe.

A continuación se muestran los resultados de la medición de la velocidad de reacción de cada sujeto.

**Tabla 16. Datos de velocidad de reacción del sujeto 1.**

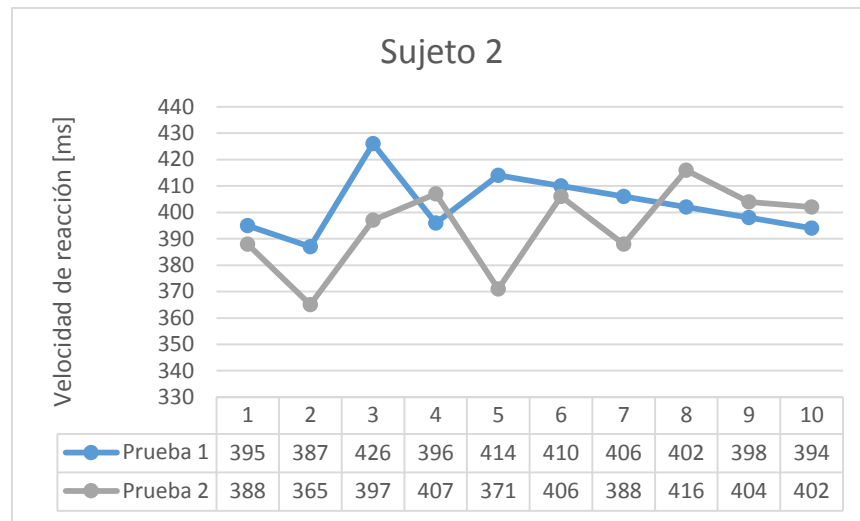
Velocidad de reacción sujeto 1			
Prueba 1		Prueba 2	
No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)	No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)
1	505	1	453
2	433	2	467
3	470	3	417
4	454	4	467
5	420	5	499
6	507	6	441
7	424	7	510
8	413	8	459
9	435	9	438
10	462	10	413
Velocidad Promedio (ms)	452,3		456,4



**Figura 53. Velocidad de reacción del sujeto 1 en cada prueba.**

**Tabla 17. Datos de velocidad de reacción del sujeto 2.**

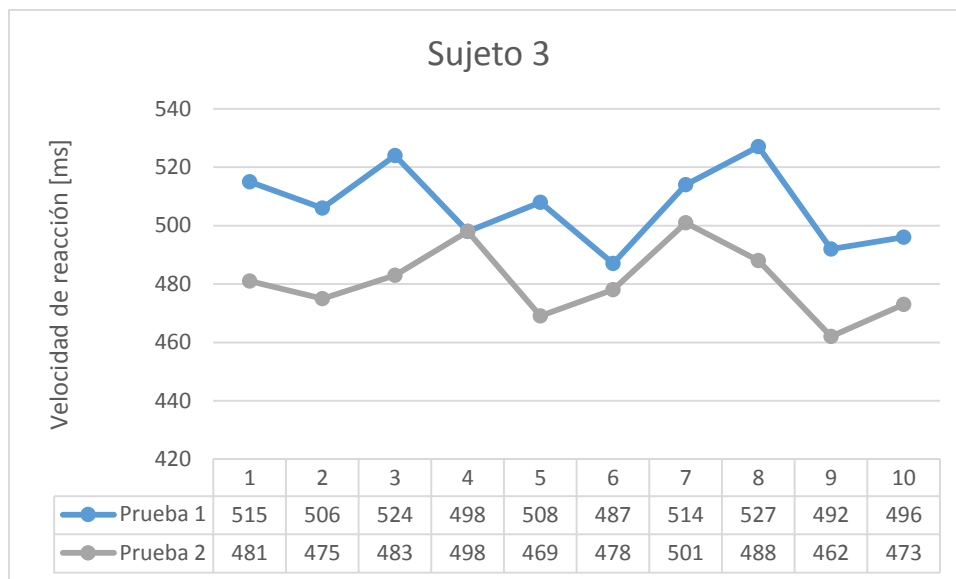
Velocidad de reacción Sujeto 2			
Prueba 1		Prueba 2	
No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)	No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)
1	395	1	388
2	387	2	365
3	426	3	397
4	396	4	407
5	414	5	371
6	410	6	406
7	406	7	388
8	402	8	416
9	398	9	404
10	394	10	402
Velocidad Promedio (ms)	402,8		394,4



**Figura 54. Velocidad de reacción del sujeto 2 en cada prueba.**

**Tabla 18. Datos de velocidad de reacción del sujeto 3.**

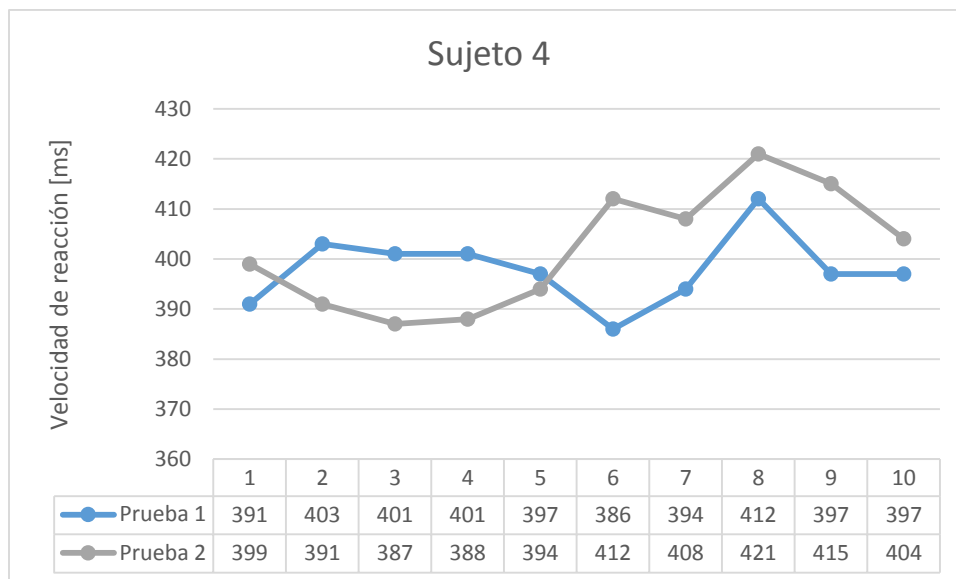
Velocidad de reacción Sujeto 3			
Prueba 1		Prueba 2	
No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)	No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)
1	515	1	481
2	506	2	475
3	524	3	483
4	498	4	498
5	508	5	469
6	487	6	478
7	514	7	501
8	527	8	488
9	492	9	462
10	496	10	473
Velocidad Promedio (ms)	506,7		480,8



**Figura 55. Velocidad de reacción del sujeto 3 en cada prueba.**

**Tabla 19. Datos de velocidad de reacción del sujeto 4.**

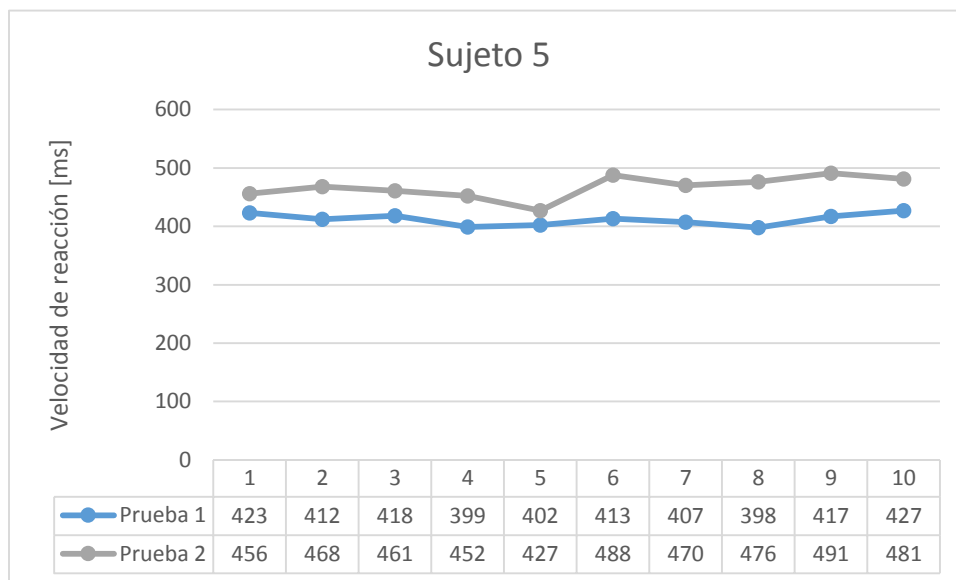
Velocidad de reacción Sujeto 4			
Prueba 1		Prueba 2	
No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)	No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)
1	391	1	399
2	403	2	391
3	401	3	387
4	401	4	388
5	397	5	394
6	386	6	412
7	394	7	408
8	412	8	421
9	397	9	415
10	397	10	404
Velocidad Promedio (ms)	397,9		401,9



**Figura 56. Velocidad de reacción del sujeto 4 en cada prueba.**

**Tabla 20. Datos de velocidad de reacción del sujeto 5.**

Velocidad de reacción Sujeto 5			
Prueba 1		Prueba 2	
No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)	No. Golpe	Velocidad de reacción(ms)
1	423	1	456
2	412	2	468
3	418	3	461
4	399	4	452
5	402	5	427
6	413	6	488
7	407	7	470
8	398	8	476
9	417	9	491
10	427	10	481
	411,6		467



**Figura 57. Velocidad de reacción del sujeto 5 en cada prueba.**

Se observa que la velocidad de reacción de los sujetos que realizaron la prueba, tiende a permanecer estable en la mayoría de los casos. Es posible que con un entrenamiento adecuado, los deportistas puedan incrementar esta velocidad y obtener tiempos cada vez más bajos. Es importante que en pruebas futuras el sujeto se encuentre a la misma distancia y con postura similar; de esta manera se realizaría la prueba en condiciones similares. Para la prueba 2 se observa una tendencia al aumento de la velocidad de reacción. Esto puede deberse al cansancio de los sujetos después de haber realizado la prueba 1.

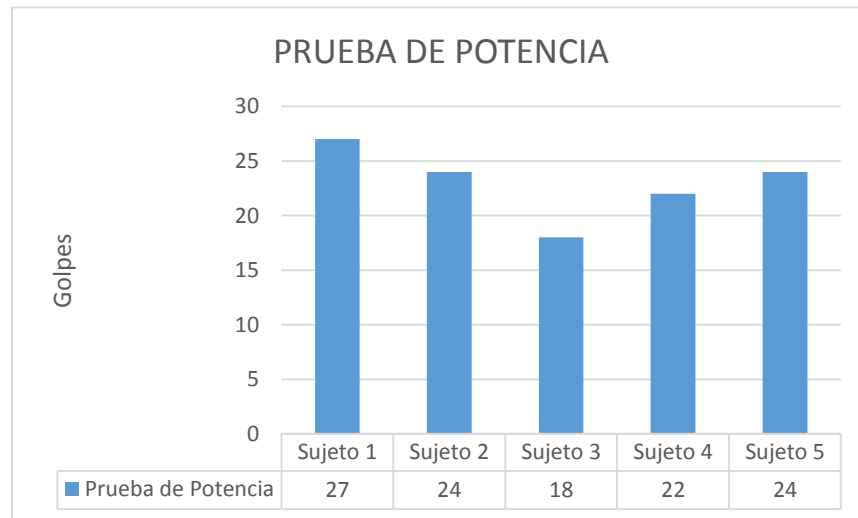
#### **4.3.3 Prueba 3: Potencia**

La prueba consistía en realizar un conteo de los golpes que la persona podía ejecutar en un periodo de 10 segundos. El sujeto debía intercalar las extremidades superiores con cada golpe.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la prueba de potencia para cada sujeto (tabla 21 y figura 58).

**Tabla 21. Resultados de prueba de potencia.**

<b>Prueba de Potencia</b>	
Cantidad de Golpes en 10 segundos	
Sujeto 1	27
Sujeto 2	24
Sujeto 3	18
Sujeto 4	22
Sujeto 5	24



**Figura 58. Prueba de potencia.**

Los resultados obtenidos para la prueba de potencia se encuentran entre 1.8 y 2.7 golpes por segundo. Estos resultados se acercan a los obtenidos por Chadli et al (2014) cuyos resultados varían entre 1.85 y 4.27 golpes por segundos.

Se espera que un deportista profesional pueda ejecutar mayor cantidad de golpes por segundo debido a que su entrenamiento y desarrollo muscular le permiten obtener mayor fuerza explosiva.



## 5. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

- Se seleccionaron los diferentes transductores y los dispositivos que cumplen con las especificaciones establecidas en la etapa de diseño.
- Se construyó un sistema de instrumentación que permite medir la fuerza y aceleración de un golpe con rangos de medición entre 0 N y 4000 N para la fuerza y 0 g y 100 g para la aceleración.
- El dispositivo construido también puede usarse para contar el tiempo entre un estímulo visual y la ejecución del gesto como método para evaluar la velocidad de reacción. Además se puede realizar una medida de la potencia del deportista por medio del conteo del número de golpes ejecutados en 10 segundos.
- Se evaluó el desempeño del dispositivo mediante pruebas de campo siguiendo un protocolo de evaluación desarrollado. Un análisis inicial de resultados indica que el dispositivo es capaz de medir las variables de interés con buena precisión.

### Consideraciones finales

- Al momento de realizar la calibración de las celdas de carga, se aplicó una fuerza estática al dispositivo. Cuando se realiza el golpe, se aplica una fuerza dinámica y esto puede producir una diferencia en la respuesta eléctrica de las celdas, ocasionando una variación en la medida. Sin embargo, el propósito de este trabajo es mostrar la evolución del deportista en el tiempo siguiendo un plan de entrenamiento. Por lo cual la exactitud de la medida no es un factor tan importante como la precisión.
- En caso de querer medir la velocidad de un golpe, se recomienda implementar un circuito integrador a la salida del sensor de aceleración.
- Es conveniente realizar pruebas del dispositivo en las cuales los sujetos sean deportistas de combate profesionales o artistas marciales con el fin de verificar el funcionamiento adecuado del dispositivo como herramienta de ayuda para la planificación de su entrenamiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Baechle, T. R., Earle, R. W., & National Strength and Conditioning Association. (2007). *Principios del entrenamiento de la fuerza y del acondicionamiento físico*. Buenos Aires: Médica Panamericana.
- Bompa, T. O. (2006). Periodización del Entrenamiento Deportivo. *Paidotribo*.
- Bompa, T. O., Enseñat Sole, A., & Blanco, A. (2003). *Periodización: teoría y metodología del entrenamiento*. Barcelona: Hispano Europea.
- Brown, L. E. (2008). *Entrenamiento de la fuerza*. Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Campos Granell, J., & Ramón Cervera, V. (2001). *Teoría y planificación del entrenamiento deportivo*. [Barcelona]: Editorial Paidotribo.
- Chadli, S., Ababou, N., & Ababou, A. (2014). A New Instrument for Punch Analysis in Boxing. *Procedia Engineering*, 72, 411-416. doi:10.1016/j.proeng.2014.06.073
- George, J. D., Fisher, A. G., & Padró, J. (1996). *Tests y pruebas físicas*. Barcelona: Paidotribo.
- González Badillo, J. J., & Gorostiaga Ayestarán, E. (2002). *Fundamentos del entrenamiento de la fuerza, aplicación al alto rendimiento deportivo*. Barcelona: INDE.
- Heyward, V. H. (2008). *Evaluación de la aptitud física y prescripción del ejercicio*. Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Kalpakjian, S., Schmid, S. R., & Sánchez García, G. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. México, D.F.: Pearson Educación.

- López Chicharro, J., López Mojares, L. M., & Aguila Pérez, L. del. (2008). *Fisiología clínica del ejercicio*. Madrid: : Editorial Médica Panamericana.
- Martínez López, E. J., & Hervás García, J. (2002). *Pruebas de aptitud física*. [Barcelona]: Editorial Paidotribo.
- Measurement specialties. (2013, agosto 5). Model 832M1 Accelerometer.
- Meijer, G. C. M. (Ed.). (2008). *Smart sensor systems*. Chichester, U.K: J. Wiley & Sons.
- Morente Montero, A., Benitez Sillero, J. de D., & Rabadán de Cos, I. (2013, diciembre). La velocidad: Aspectos teóricos. *Efdeportes*, 67.
- Ortíz Cervera, V. (1996). *Entrenamiento de fuerza y explosividad para la actividad física y el deporte de competición*. Barcelona: INDE Publicaciones.
- Pallás Areny, R. (2003). *Sensores y acondicionadores de señal*. Barcelona: Marcombo Boixareu.
- Patranabis, D. (2004). *Sensors and transducers*. New Delhi: Prentice-Hall of India.
- Pinillos Ribalda, M., & González Calleja, F. (2011). La velocidad de anticipación en los deportes: utilidad del constructo y diferencia con el tiempo de reacción. *Revista de orientación educacional*, 25(48), 95-106.
- Robertson, D. G. E. (2014). *Research methods in biomechanics* (Second edition.). Champaign, Illinois: Human Kinetics.
- Robles Pérez, J. J. (2014). *El Tiempo de Reacción Específico Visual en Deportes de Combate*. Universidad Autónoma de Madrid, España.

- Sánchez Garreta, J. S. (2003). *Ingeniería de proyectos informáticos: actividades y procedimientos*. Castelló de la Plana: Universitat Jaume I.
- Tomasi, W., Mata Hernández, G., & García Bisogno, V. (2003). *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: Pearson Educación.
- Tortora, G. J., & Derrickson, B. (2006). *Principios de anatomía y fisiología*. México: Médica Panamericana.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2009). *Diseño y desarrollo de productos*. México: McGraw-Hill/Interamericana.
- Vidal Barbier, M. (2000). *La fuerza y la musculación en el deporte: sistemas de entrenamiento con cargas*. Madrid: Librerías Deportivas Esteban Sanz.
- Webster, J. G., & Eren, H. (Eds.). (2014). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook: electromagnetic, optical, radiation, chemical, and biomedical measurement* (Second edition.). Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Zatsiorsky, V. M. (2006). *Science and practice of strength training* (2nd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Zhelyazkov, T. (2001). *Bases del entrenamiento deportivo*. Barcelona: Editorial Paidotribo.

## **Anexo 1. Protocolo de evaluación**

Para comprobar el funcionamiento del dispositivo se realiza el siguiente protocolo:

1. Se enciende el computador que contiene el software del dispositivo. Se verifica que el circuito de medición de la fuerza se encuentre debidamente conectado con el computador por medio de la plataforma Arduino. De igual manera se verifica la conexión del circuito de medición de la aceleración al computador por medio de módulo de transmisión inalámbrica.
2. Selección de la extremidad a la cual se le realizará la medición de aceleración. Posteriormente se sitúa y ajusta la caja que contiene el circuito de medición sobre la extremidad elegida.
3. Se inician los programas en el computador y se verifica que la conexión entre el hardware y software del dispositivo sea correcta.

A continuación se procede con la toma de medidas. Todos los golpes ejecutados se deben dirigir hacia el centro de la placa para mejorar la precisión de la medición. La prueba se divide en tres secciones que son:

4. Fuerza y aceleración: La persona deberá ejecutar una serie de 10 golpes en los cuales intentara ejercer con fuerza y aceleración máxima. Cuenta con un tiempo límite de 50 segundos para realizar los 10 golpes. Finalizada esta sección se retira la caja con el circuito de medición de la aceleración y se continúa con la prueba.
5. Velocidad de reacción: La persona se ubica a 40cm de distancia del dispositivo y debe ejecutar un golpe al recibir una señal visual. Dicha señal será el cambio de color (Rojo a verde) de una matriz de LEDs ubicada en la parte superior derecha de la base. Para completar la prueba se emitirán 10 estímulos, cada uno varía en un periodo entre 4 y 7 segundos. El sujeto de prueba debe intentar mantener la misma distancia y postura para cada golpe, esto se hace con el objetivo de simular condiciones iguales para el número total de estímulos.
6. Potencia: La prueba consiste en realizar un conteo de los golpes que la persona puede ejecutar en un periodo de 10 segundos. El sujeto debe intercalar las extremidades superiores con cada golpe.

La persona debe realizar dos veces la prueba anterior. Debido a que el ejercicio de potencia es de alta intensidad física, solo se realizará una vez por sujeto.

## Anexo 2. Consentimiento informado

Yo \_\_\_\_\_ identificado con cédula de ciudadanía número \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ estoy de acuerdo en participar en la prueba de evaluación de un dispositivo para medir fuerza y velocidad de los golpes de un deportista de combate. Durante estas pruebas, los estudiantes desarrolladores del proyecto supervisarán el cumplimiento adecuado del protocolo establecido.

Se me ha explicado que la investigación hace parte de un trabajo de grado de la Escuela de Ingeniería de Antioquia (EIA) y que toda la información será usada, únicamente, con fines académicos.

También soy consciente que puedo retirarme de la investigación en cualquier momento que lo desee y los investigadores estarían en la obligación de deshacerse de cualquier información que se relacione conmigo.

X

---

Ante cualquier inquietud pueden comunicarse con los desarrolladores del proyecto en los siguientes números:

Ricardo Restrepo Aramburo

3046589540

Jairo Andrés Pico Morales

3003228211